



Institut für Elektrotechnik

Masterarbeit

Realisierung (inkl. Felderprobung) eines
Balancing- und Monitoringsystems für
USV-Batterien mit langer
Überbrückungsdauer

Johannes Jörg Deisinger, BSc

November 2021



EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 02.11.2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Deisinger', written over a horizontal line.

Unterschrift Verfasser/in
Johannes Jörg Deisinger

Danksagung

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Weiß, der mir als Betreuer meiner Diplomarbeit beigestanden hat. Ich schätze mich sehr glücklich, dass ich während meiner gesamten Studiendauer an der Montanuniversität Leoben von seinem umfangreichen Allgemeinwissen sowie seiner technischen Expertise lernen konnte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Elektrotechnik für die inspirierende und fördernde Arbeitsatmosphäre am Institut. Ebenso gebührt mein Dank der Alma Mater Leobensis für eine prägende und lehrreiche Zeit. Eine Zeit mit Höhen und Tiefen, mit wertvollen Erfahrungen und unvergesslichen Erinnerungen.

Ich danke meinen Eltern und meiner Lebensgefährtin für ihre grenzenlose Unterstützung nicht nur in der Phase der Diplomarbeit, sondern in allen Lebenslagen über die Studiendauer hinweg.

Kurzfassung

Elektrochemische Energiespeicher sind seit über 100 Jahren im Einsatz, doch noch nie zuvor war ihre Rolle so wichtig wie in der heutigen Zeit. Global steigt das Bewusstsein für die Vermeidung von CO₂-Emissionen und den verringerten Einsatz von fossilen Energieträgern zusehends. Der Ausbau erneuerbarer Energieformen forciert diese Ziele im ersten Schritt vorwiegend in den technokratischen Ländern der westlichen Welt. Entscheidend dafür ist aber weniger die Bereitstellung der Energie als deren Speicherung. Fluktuierende Erzeugung aus Wind, Sonne und Wasser kann den Ansprüchen an die Stromversorgung unserer Gesellschaft ohne eine stabilisierende Speicher- respektive Pufferebene zwischen Erzeuger und Verbraucher nicht gerecht werden. Wiederaufladbare elektrochemische Energiespeicher bilden nach derzeitigem Stand der Technik einen gangbaren Weg für eine digitalisierte und dezentral elektrifizierte Gesellschaft. Das Verlangen nach immer höheren Energie- und Leistungsdichten macht elektrochemische Speicherlösungen allerdings immer komplexer und kostspieliger. Aufgrund der hohen Sensibilität dieser Speicher gegenüber ihren Umgebungsbedingungen ist es notwendig, diese optimal einzusetzen und derart zu betreiben, dass eine möglichst lange Lebenszeit bei gleichzeitig sicherem Betrieb gewährleistet wird.

Meine Masterarbeit widmet sich der Entwicklung, Erprobung und Implementierung eines Batterie-Balancingsystems für Bleiakkumulatoren zur Speisung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV). Eingesetzt wird dieses System an einer Erdölförderanlage des österreichischen Mineralrohstoffkonzerns OMV. Ziel ist es, die Zellalterung zu verringern und somit die Lebensdauer der eingesetzten Batterien zu verlängern. Dazu wird das Ladeverfahren optimiert, der Ladestand unter den Zellen angeglichen und eine Beschädigung durch Überladung verhindert. Als zusätzliche Sicherheitsebene überwacht ein integriertes Temperaturmonitoring die Zellen und unterstützt hierdurch die Früherkennung bevorstehender Zelldefekte.

Der Einsatz im unmittelbaren Gefahrenbereich von Erdölsonden bedingt die Verwendung von geschlossenen Bleiakkumulatoren als sichere Speichertechnik. Prinzipiell kann das System durch geringe Adaptierungen ebenso für andere Zellchemismen ausgelegt und eingesetzt werden, sodass sich eine solide und robuste Lösung für bestehende und zukünftige Zelltypen ergibt.

Die Ergebnisse dieses Projekts habe ich in meiner Masterarbeit zusammengefasst, um den nachhaltigen Einsatz erneuerbarer Energiesysteme zu forcieren und eine Grundlage für weitere Forschung zu bieten. Gleichzeitig will ich mit dem Brückenschlag zwischen elektrochemischer Speichertechnologie und Erdölförderung auf die stets bestehende Bedeutung von Kohlenwasserstoffen in unserem Alltag hinweisen. Der bewusste Umgang und Einsatz gegebener Ressourcen ist elementar für das Bestehen unserer Gesellschaft.

Schlagwörter: Balancing, OMV, USV, Messwerterfassung, Temperaturkontrolle

Abstract

Since more than 100 years electrochemical energy storages are in use to store electrical energy in a more or less small scale but never before their role was as important as in these days. Reducing carbondioxid emissions and dependance on fosil fuels is of growing concern for todays society. For our western world the growth of renewable energy production is a decent way to accomplish these tasks. Environmentally friendly energy production is less of an issue than storing the produced energy. Fluctuation in production based on quirks of solar, wind and water are not consistent with the demands and daily habits of our society. Electrochemical energy storage seems a viable solution to overcome this issue when harvesting electrical energy to supply our needs.

The continuously growing demand for higher energy and power densities in batteries contradicts ecomies of scale. Storage technologies get even more complex and costlier. Inherity in global reserve of rare earth materials does the rest. Response to environmental conditions is another crucial factor when using electrochemical energy storage. As a result optimized utilisation of battery technology is of the essence to prolong lifetime of these devices.

For this reason my thesis aims on developing, testing and implementing a battery balancing system for lead acid batteries to energise an uninterruptible power supply for oilfield equipment. The device is used in combination with a sucker rod pump on an oilfield of the Austrian oil and gas company OMV. Key is to prolong battery life and reduce aging processes. These will be accomplished by optimizing charging characteristics, state of charge equalization and prevention of over-charging. A temperature monitoring unit will provide additional safety supporting the detection of battery defects before they get critical.

The use of lead acid batteries is essential for the application close to an active oil well. With minor adaptions the system can be used with any other existing battery technology.

Learnings of my research are documented in this thesis to support renewable energy solutions and sustainable use of resources. I hope to contribute to future research in this area and want to point out that the combination of renewable energy along with production of fosil fuel in this project illustrates that the responsible use of resources is essential for the persistence of our civilization.

Keywords: balancing, OMV, lead acid battery, temperatur measurement, uninterruptable power supply

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	1
1.1 Aufgabenstellung	3
2 ZELLTECHNISCHER HINTERGRUND	4
2.1 Die Galvanische Zelle	4
2.2 Zellenarten im Überblick	10
2.3 Akkumulatoren	13
2.3.1 Gefahren & Fehlerpotential	15
2.4 Der Bleiakкумулятор	17
2.4.1 Aufbau der Blei-Säure-Zelle	17
2.4.2 Lade- und Entladevorgang	20
2.4.3 Bleisäurespezifische Zelldefekte und Fehlerfälle	24
2.4.4 Anwendungsgebiete für Bleiakкумуляtoren	26
2.4.5 Charakteristika Oerlikon 12CP50	26
3 BALANCING	30
3.1.1 Laden ohne Balancing	30
3.1.2 Laden mit Balancing	31
3.1.3 Passives Balancing	32
3.1.4 Aktives Balancing	33
4 UNTERBRECHUNGSFREIE STROMVERSORGUNG	35
4.1.1 EATON EX 3000 RT	36
5 HARDWARE	38
5.1 Funktionsprinzip	41
5.1.1 Spannungserfassung	46
5.1.2 Spannungsauswertung und Ausgabe	48
5.1.3 Mittelwertbilder	49
5.1.4 Schmitt-Trigger	52
5.1.5 Balancer	53
5.1.6 Temperaturerfassung	56
5.1.7 Displayeinheit	59
5.1.8 Versorgung	62
6 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG	65

6.1	Versuchsaufbau	65
6.1.1	Vorbereitende Tätigkeiten	65
6.2	Feldtest	68
7	LESSON LEARNED & VERBESSERUNGSPOTENTIAL	76
7.1	Detailverbesserungen	77
7.1.1	Balancing-Zähler	77
7.1.2	Balancing auf Zellebene	77
8	AUSBLICK.....	78
9	LITERATURVERZEICHNIS	79
10	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	82
11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	83
12	TABELLENVERZEICHNIS	86

1 EINLEITUNG

Der Beginn der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert hat für die Menschheit das Zeitalter von Wohlstand, sozialem Aufstieg und technologischem Fortschritt eingeläutet. Dabei sind diese Begriffe stets mit der Entwicklung und Nutzung immer leistungsstärkerer Energieträger verbunden, da erst das Streben und Verlangen nach Gütern und Produkten den sozialen Aufstieg einer Gesellschaft mit sich bringt. Während zu Beginn des 20. Jahrhunderts noch eine zentrale Dampfmaschine alle Maschinen in einer Fertigungshalle über einen Riemenantrieb angetrieben hat, reden wir heute von teils energieautonomen Produktionssystemen, die es erlauben, einen Betrieb über die eigene Photovoltaikanlage am Hallendach oder Außenbereich zu betreiben. An produktionsfreien Tagen und Wochenenden kann die erzeugte elektrische Energie zusätzlich in das örtliche Versorgungsnetz eingespeist werden und so zur Deckung des allgemeinen Energiebedarfs beitragen. Dieser technologische Fortschritt wirkt sich unweigerlich auf unsere Gesellschaft aus. Nicht nur der Drang und das Streben nach immer weiteren Innovationen bestimmt unser Leben und unseren Arbeitsalltag. Auch das Verlangen nach Selbstverwirklichung und individueller Freiheit haben für die meisten an Bedeutung gewonnen. Ohne zuverlässige Energieversorgung können jedoch weder die individuellen Bedürfnisse noch die komplexen sozioökonomischen Mechanismen unseres Gesellschaftssystems bedient werden. Der Energiebedarf des Einzelnen ist dabei auf einen Durchschnittswert von 8000 Watt pro Person und Tag gestiegen. Das Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft soll diesem Energiehunger entgegenwirken. [1]

Mit dem Beschluss des Erneuerbaren Ausbaugesetzes (kurz EAG) setzt sich der österreichische Staat das ambitionierte Ziel, bis 2030 den gesamten nationalen Stromverbrauch aus erneuerbaren Quellen zu decken. Dazu müssen durch entsprechende regulierende Maßnahmen 27 zusätzliche Terawattstunden an Energie aus erneuerbaren Energieformen bereitgestellt werden. Darüber hinaus wird es Privathaushalten ermöglicht, sich zu sogenannten Energiegemeinschaften zusammenzuschließen, um produzierten Strom gemeinsam je nach Bedarf auszutauschen, zu vertreiben und zu verrechnen. [2] Diese im Allgemeinen begrüßenswerte Entwicklung am österreichischen Strom- und Energiemarkt macht aber auch die strukturellen Defizite in den Stromverteilungsnetzen sichtbar. Damit verbunden und zunehmend bedeutender ist die Notwendigkeit der Energiespeicherung. Es werden dezentrale Energiespeicher benötigt, um bei Überproduktion elektrische Energie aus den Netzen zu ziehen und diese dadurch zu stabilisieren. Darüber hinaus muss diese Überschussenergie in Zeiten mangelnder Versorgung aus erneuerbarer Energieproduktion ins Netz rückgespeist werden, um den allgemein herrschenden Bedarf zu decken und so die Fluktuation in der Energiebereitstellung aus Erneuerbaren zu kompensieren. Die aktuell diskutierten Ansätze hinsichtlich zukünftiger Speicherlösungen sind vielseitig und reichen von mechanischen Lösungen wie Schwungrädern, über thermische Speicher auf organischer Basis bis hin zu unzähligen Varianten von elektrochemischen Energiespeichern. Unabhängig von der eingesetzten Technologie wird sich der Erfolg vor allem durch die generelle Praktikabilität und die Wirtschaftlichkeit im Alltagseinsatz einstellen.

In meiner Masterarbeit beschäftige ich mich mit dem Aufbau einer Variante eines solchen dezentralen Energiespeichers für die unterbrechungsfreie Stromversorgung an einem Bohrplatz des österreichischen Mineralölkonzerns OMV. Basierend auf herkömmlicher Blei-Säure-Batterietechnik versorgt dieses Speichersystem die Messtechnik vor Ort mit Strom, falls Fehler in der Stromversorgung oder ein genereller Netzausfall auftreten.

Unabhängig von der eingesetzten Zelltechnologie wird es immer wichtig sein, die verwendeten Zellen entsprechend ihrem Typus und Konzeption einzusetzen. Dazu ist es notwendig, auf die Charakteristika des zugrundeliegenden Chemismus einzugehen. Geeignete thermische Rahmenbedingungen, sowie angemessenes Lade- und Entladeverhalten sind essenziell, um eine hohe Standfestigkeit und somit Lebensdauer des Speichersystems zu erreichen. Schon in der Definition des Einsatzgebietes ist es wesentlich, auf die richtige Technologie zu setzen. Wird die Batterie zum Beispiel zur Versorgung eines Betriebs oder eines Haushalts mit relativ konstantem oder vorhersehbarem Lastprofil eingesetzt, wird man auf eine Speicherbatterie setzen. Im Gegensatz dazu werden Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen auch als Leistungsbatterie ausgelegt. Sie verkraften spontane Lastwechsel zwischen hoher Leistungsabgabe beim Beschleunigen und Rekuperation beim Bremsen besser als Zellen, die für den stationären Gebrauch konzipiert sind.

Unabhängig von der Art des Einsatzgebietes gilt es, den ökologischen Fußabdruck der Batterie so gering wie möglich zu halten, um konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Energieträgern zu sein. Eine wesentliche Rolle spielen die verwendbare Kapazität und die zu erwartende Batterielebensdauer. Der hohe Ressourcenaufwand in der Herstellung und die damit verbundenen Kosten können sich erst über eine entsprechende Betriebsdauer amortisieren. Erreicht wird dies durch den Einsatz eines effizient gestalteten Batteriemanagementsystems (BMS), das die Leistungsaufnahme bzw. -abgabe an die jeweils gegebenen Bedingungen anpasst. Einen integralen Teil des Batteriemanagements stellt das sogenannte Battery Balancing dar. Balancing-Schaltungen sorgen unter anderem dafür, dass die einzelnen Zellen in einer Batterie einen gleichmäßigen Ladungszustand aufweisen. Ein Überladen einzelner Zellen und der damit verbundene Ausfall der gesamten Batterieeinheit kann dadurch verhindert werden.

Der Aufbau eines solchen Balancingsystems mit integriertem Temperaturmonitoring ist Inhalt meiner Masterarbeit. Ziel ist es, eine robuste Balancing Einheit zu entwickeln, die in weiterer Folge an einem Bohrplatz des österreichischen Erdölkonzerns OMV zur Energieversorgung einer USV für Feldmessequipment aufgebaut werden soll. Ich werde hierzu genauer auf die Arten von Balancing und die im zugrundeliegenden Fall verwendeten Zelltypen eingehen. Des Weiteren werde ich die Logik und den Aufbau meines Systems erläutern und beleuchten, wodurch sich mein System von marktüblichen Standardprodukten unterscheidet.

1.1 Aufgabenstellung

Das dezidierte Ziel meiner Masterarbeit liegt in der Konzeptionierung, Erprobung und Implementierung eines robusten Balancingsystems für den Feldeinsatz des Österreichischen Mineralrohstoffkonzerns OMV. Dieses System gewährleistet den korrekten Ladezustand der Blei-Säure-Akkus, die notwendig sind, um die unterbrechungsfreie Stromversorgung der Messtechnik am Bohr- oder Förderplatz auch im Fehlerfall beziehungsweise im Falle eines Netzausfalls zu versorgen. Die Schaltung muss die Ladung der vorhandenen Akkus so regeln, dass das gesamte Akkupaket den maximalen Ladezustand erreicht, ohne dabei einzelne Zellen im Verbund zu überladen. Ebenso darf es nicht vorkommen, dass die Gesamtkapazität durch defekte Einzelzellen kompromittiert wird. Zusätzlich sollen die Temperaturen der Akkupakete während des Ladevorgangs erfasst werden. Zelldefekte zeichnen sich oft schon im Voraus durch Temperaturanomalien der entsprechenden Zellen ab. Das Temperaturtracking soll solche Fehler sichtbar machen und den vorzeitigen Austausch der auffälligen Akkupakete ermöglichen, ehe es zum Versagensfall kommt.

Die gesamte Auslegung verlangt aufgrund der komplexen Einsatzbedingungen einen Aufbau, der robust genug ist, um den widrigen und undefiniert wechselnden Umgebungsbedingungen an Förderplätzen der OMV zu widerstehen. Die Technik wird dabei von extremen Temperaturen und Temperaturwechseln sowie durch Schmutz und Staub belastet. Mechanische Einflüsse können ebenso nicht ausgeschlossen werden. Diese Anforderungen gilt es beim Entwurf der Schaltung zu berücksichtigen. Ebenso müssen das Design und die Komponenten so gewählt werden, dass der Funktionsumfang diesen Belastungen widerstehen kann, ohne dabei den wirtschaftlichen Aspekt außer Betracht zu lassen. Bei erfolgreicher Testphase muss es möglich sein, dieses System kosteneffizient zu skalieren und bei weiteren Förderanlagen mit entsprechender Messtechnik zu implementieren. Die Vorteile ergeben sich durch die längere Lebensdauer der eingesetzten Batterietechnik, dem damit reduzierten Wartungs- und Investitionsaufwand sowie der frühzeitigen Erkennung potentieller Fehler- und Gefahrenquellen in der Batterietechnik.

2 Zelltechnischer Hintergrund

2.1 Die Galvanische Zelle

Die Funktion der galvanischen Zelle bildet den Grundstein für die heute gängige Batterie- und Akkutechnologie. Die Erfindung des galvanischen Elements ist auf die ersten Versuche von Luigi Galvani um 1780 zurückzuführen und wurde in weiterer Folge u.a. von Alessandro Volta (1800) und Georges Leclanché verfeinert. Prinzipiell erlaubt eine galvanische Zelle die spontane Umwandlung von chemischer in elektrische Energie. Dies ist möglich, weil in zwei räumlich voneinander getrennten Halbzellen jeweils eine Reduktions- und eine Oxidationsreaktion zeitgleich ablaufen. [3]

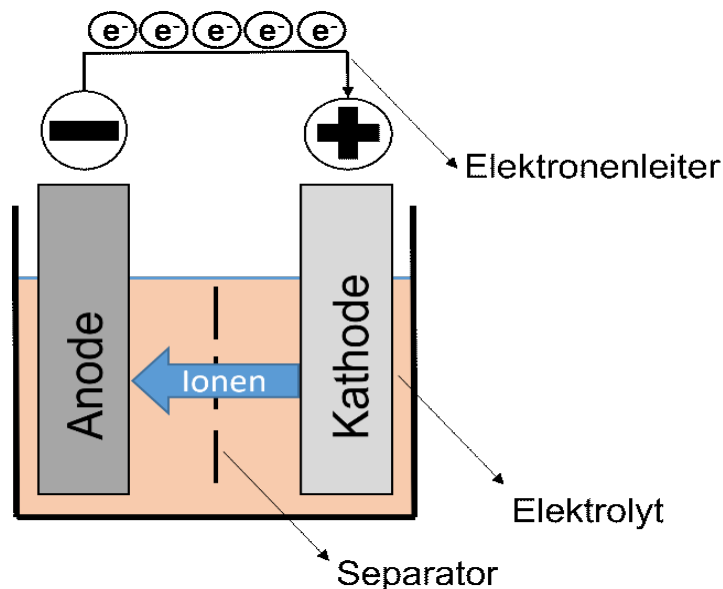


Abbildung 2-1 Schema der galvanischen Zelle nach [4]

Bestandteile einer Galvanischen Zelle

- Anode
- Kathode
- Elektrolyt
- Separator oder Diaphragma
- Externer Elektronenleiter oder Last

Für den grundlegenden Aufbau werden zwei Halbzellen benötigt. Jede Halbzelle beinhaltet eine Metallelektrode und den dazugehörigen Elektrolyten. Die Auswahl des Elektrodenmaterials erfolgt nach der Reihung des jeweiligen Metalls in der elektrochemischen Spannungsreihe, in der die Materialien entsprechend ihren Standardelektrodenpotentialen gereiht sind. [5]

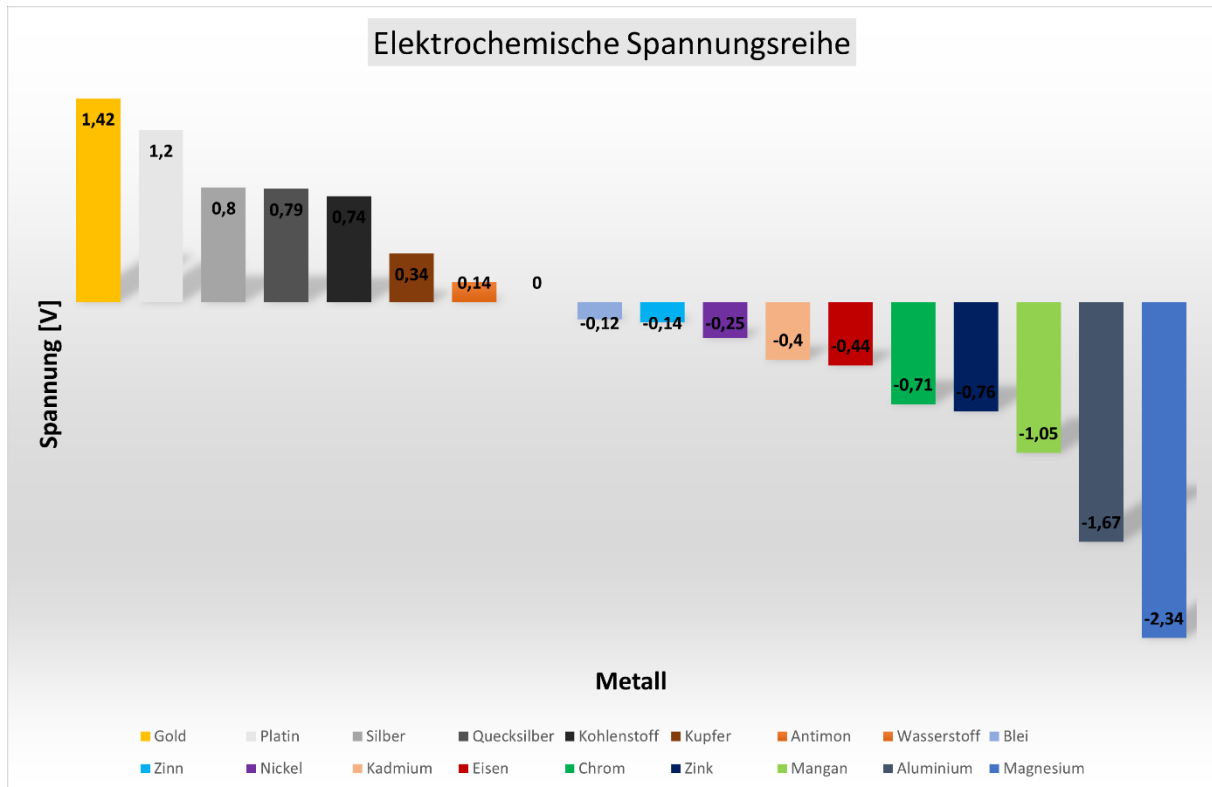


Abbildung 2-2 Elektrochemische Spannungsreihe nach [6]

Jenes Metall, das in der hier abgebildeten Spannungsreihe weiter links steht, bildet die Kathode der galvanischen Zelle, das unedlere, weiter rechtsstehende Metall die Anode. Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich sind die beiden Halbzellen räumlich voneinander getrennt, die Elektroden allerdings durch einen elektrischen Leiter miteinander verbunden. Sobald die Oxidation an der Anode beginnt, werden Elektronen freigesetzt, die mangels Alternativen zum Ausgleich der Elektronendifferenz zwischen den Zellen über den Leiter zur Kathode wandern müssen. Ein Amperemeter, das im Aufbau mit dem elektrischen Leiter verbunden ist, detektiert diesen Elektronenfluss. Zur Herstellung der notwendigen elektrischen Neutralität zwischen den Halbzellen sind diese über eine Salzbrücke, die gewöhnlich über ein elektrolytgefülltes U-Rohr ausgeführt ist, verbunden. Der Elektrolyt in der Salzbrücke erlaubt nur den Fluss von Ionen, nicht aber von Elektronen und ermöglicht so den Ionenaustausch von der kathodischen zur anodischen Halbzelle. Dieser Mechanismus gewährleistet die elektrische Neutralität der gesamten Zelle. [4]

Das Daniell-Element

Das Daniell-Element ist eine galvanische Zelle, die die zugrundeliegende Funktionsweise und den Ablauf der chemischen Reaktion sehr gut veranschaulicht. Zur Vereinfachung wird das Element in zwei separate, räumlich voneinander getrennte Halbzellen zerlegt. Die erste Halbzelle besteht aus einer Lösung aus Zinksulfat. Darin befindet sich dem Elektrolyten entsprechend eine Zinkelektrode. Die zweite Halbzelle setzt sich aus einer Kupfersulfatlösung und akkordierender Kupferelektrode zusammen. Der oben angeführte Auszug aus der elektrochemischen Spannungsreihe zeigt, dass Zink mit einem Standardpotential von $E_0 = -0,76 \text{ V}$ (im Vergleich zu Kupfer mit $E_0 = +0,34 \text{ V}$) negativer und damit unedler ist. Daraus resultierend bildet die Halbzelle auf Zink-Basis die Anode, also negative Elektrode bei der ablaufenden Entladungsreaktion, während Kupfer als positive Elektrode (Kathode) wirkt.

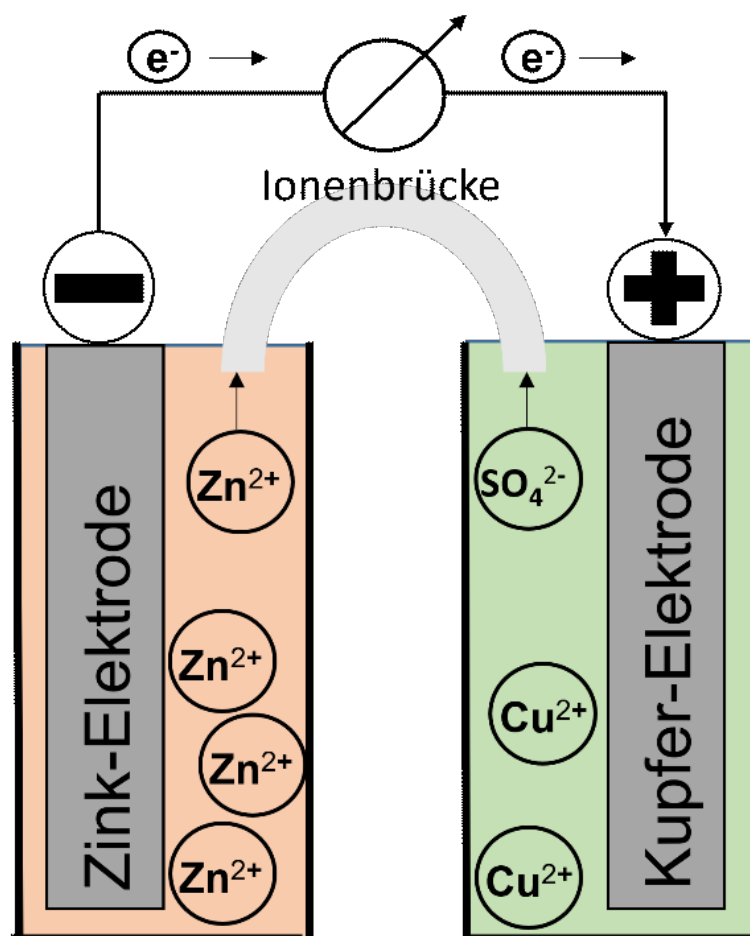


Abbildung 2-3 Das Daniell-Element nach [4]

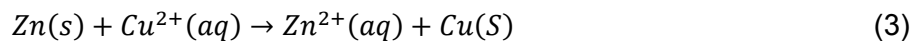
- Anodenreaktion (Oxidation)



- Kathodenreaktion (Reduktion)



- Gesamtreaktion



Die unedle Zink-Elektrode weist die höhere Lösungstension auf, weshalb dort die Oxidation abläuft. Zink-Metall wird zu Zink-Ionen reduziert, welche daraufhin vermehrt in die ZnSO_4 -Lösung übergehen. Der Elektronenüberschuss, der sich in der Zink-Anode ergibt, wandert zum Ladungsausgleich über den externen Leiter zur Kupfer-Elektrode. Ein Voltmeter detektiert die Spannung, die durch den Elektronentransfer über den elektrischen Leiter erzeugt wird. Die zusätzlichen Elektronen in der Kathode sorgen dafür, dass Cu^{2+} -Ionen aus der Kupferlösung entfernt werden und sich so zusätzliches metallisches Kupfer an der Kathode absetzt. An der Kathode bleiben nur mehr SO_4^{2-} -Ionen in der Lösung zurück. Während der externe Ladungsausgleich zwischen den Elektroden über den elektrischen Leiter erfolgt, wird der interne Ladungsausgleich über die sogenannte Ionenbrücke realisiert. Dabei handelt es sich um ein U-Rohr, in dem die Zn^{2+} -Ionen von der Anode zur Kathode wandern können, während sich die SO_4^{2-} von der Kathode weg in die entgegengesetzte Richtung zur Anode bewegen. Die Verbindung der Gefäße über das U-Rohr schließt also den Stromkreis und gewährleistet Ladungsneutralität zwischen den Halbzellen. [4]

	Anode	Kathode
Prozess	Oxidation	Reduktion
Potential der galvanische Zelle	negativ (-)	positiv (+)
Potential der elektrolytischen Zelle	positiv (+)	negativ (-)

Tabelle 1: Elektrodenbezeichnung im Vergleich nach [47]

Die Elektromotorische Kraft

Das Beispiel der Daniell-Zelle zeigt, wie der Unterschied zwischen den Standardpotentialen zweier Stoffe genutzt wird, um einen elektrischen Stromfluss zu erzeugen. Das elektrische Potential, das sich aus der Kombination von zwei Redoxpartnern in einer galvanischen Zelle ergibt, wird als elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet. Diese Kraft ergibt sich aus dem elektrostatischen Feld als Produkt von Spannung [V] und Ladung [C] ab. Gemessen wird die EMK als Kraft pro Ladung in der Einheit Volt [V]. Die Elektrodenpotentiale der einzelnen Stoffe sind wie weiter oben angeführt in der elektrochemischen Spannungsreihe erfasst und entsprechend ihrem Standardpotential geordnet. Die in der elektrochemischen Spannungsreihe erfassten Werte ergeben sich aus dem Abgleich der einzelnen Stoffe mit einer standardisierten Normalwasserstoffelektrode, welche per Definition ein Potential von Null aufweist und damit als Referenz gesetzt wird. [5]

Unter Zuhilfenahme der Redoxreihe kann nun das Zellpotential ΔE des angeführten Daniell-Elements berechnet werden. Dazu entnehmen wir die Standardpotentiale des Redoxpaares aus der Redoxreihe und setzen die entsprechenden Werte für $\Delta E = E_2^0 - E_1^0$ bzw. $\Delta E = E_{\text{Kathode}} - E_{\text{Anode}}$ ein. Die Konvention beruht darauf, dass die Reaktion in diese Richtung spontan abläuft und ΔE daher immer einen positiven Wert annimmt.

Beispiel Daniell-Element:

Kathodenreaktion (Reduktion)



$$E^0 = +0,34 \text{ V}$$

Anodenreaktion (Oxidation)



$$E^0 = -0,76 \text{ V}$$

Gesamtreaktion



$$EMK = \Delta E^0 = E^0(\text{Kathode}) - (E^0(\text{Anode})) = 1,10 \text{ V} \quad (7)$$

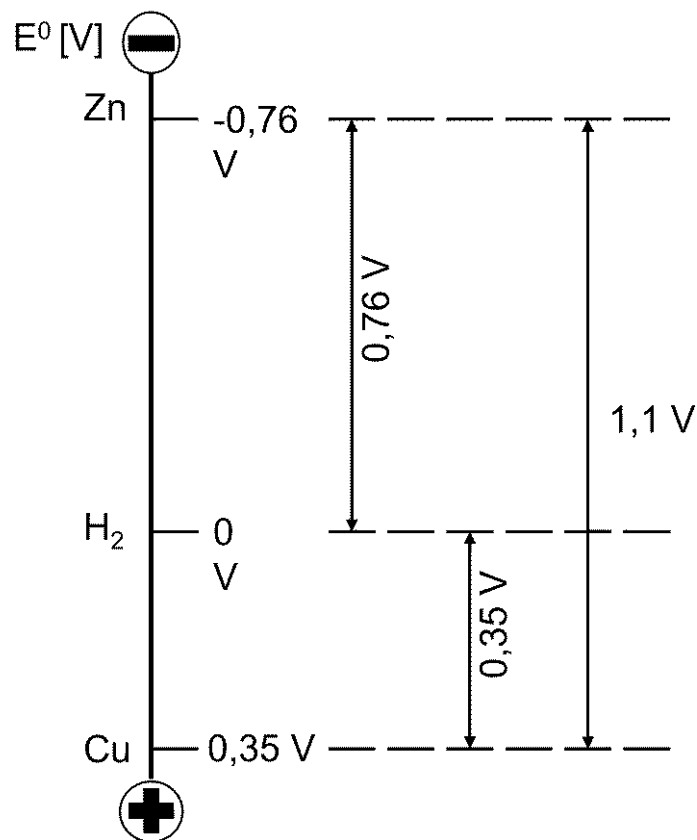


Abbildung 2-4: Standardpotential des Daniell-Elementes nach [5]

Für das Daniell-Element ergibt sich eine elektromotorische Kraft von 1,1V. Durch die Kombination entsprechender Redoxpartner lassen sich Zellen konstruieren, die genau auf die notwendigen Strom- und Spannungsparameter des definierten Einsatzgebietes ausgelegt sind. Hinzu kommt, dass es Varianten gibt, bei denen der durch die elektromotorische Kraft getriebene, spontan ablaufende Prozess durch das Anlegen einer äußeren Spannung wieder rückgängig gemacht werden kann. Die Elektrolyse ist also der Umkehrprozess zur galvanischen Zelle.

Auf die unterschiedlichen Varianten von Zellen, deren Aufbau und Eigenschaften, werde ich im folgenden Kapitel detaillierter eingehen.

2.2 Zellenarten im Überblick

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben basieren die heutzutage eingesetzten chemischen Energiespeicher auf dem Prinzip der galvanischen Zelle. Abgestimmt auf den Verwendungszweck ergeben sich allerdings Unterschiede in der Konzeption dieser Zellen. Wesentliche Kriterien für die Auslegung von Zellen sind:

- Elektrische Leistungsfähigkeit
- Größe / Bauform
- Kosten
- Sicherheit
- Umweltverträglichkeit /Recycling
- Zuverlässigkeit

Für die Auswahl und den Vergleich zwischen Zellenarten oder Chemismen werden in der Regel die Speicherfähigkeit als spezifische Energiedichte in Wh/kg oder die spezifische Leistungsdichte in W/kg herangezogen. [8]

Prinzipiell lassen sich galvanische Zellen in drei Kategorien einteilen, die wie folgt charakterisiert sind.

Die Primärzelle

Bei der Primärzelle, umgangssprachlich als Batterie oder Einwegbatterie bezeichnet, handelt es sich um eine galvanische Zelle, die für die einmalige Verwendung konzipiert ist. Die Primärzelle erreicht mit der Herstellung ihre maximale Ladung und gibt diese bei Gebrauch durch eine elektrochemische Reaktion wie zuvor beschrieben ab. Die Zelle gilt als erschöpft, sobald die Reaktionspartner umgesetzt sind und sich das thermodynamische Gleichgewicht eingestellt hat. Das bedeutet, dass die chemischen Vorgänge in diesem Zelltyp nicht reversibel sind. Die Reaktionsprodukte einer Primärzelle können durch das Anlegen einer externen Spannung nicht in ihre Reaktanden, also den Ausgangszustand, übergeführt werden. Der Grund dafür liegt in der verwendeten Zellchemie. Eingesetzt werden wässrige oder nichtwässrige Systeme mit Zellspannungen im Bereich von ein bis vier Volt. Bei den wässrigen Systemen basiert die Limitierung der Zelle auf der Zersetzung des Wassers während der Entladung. Nach vollständiger Zer- bzw. Umsetzung ist der Elektrolyt aufgebraucht und die Zelle erschöpft. Bei nichtwässrigen Systemen kommen feste, organische oder anorganische Elektrolyte zum Einsatz. Ebenso werden bei diesen Varianten die Elektrolyten während der Entladung irreversibel umgesetzt oder zerstört. [8]

Trotz dieses verbrauchenden Verhaltens finden Primärzellen unzählige Anwendungsfelder. Ein entscheidender Vorteil von Primärbatterien liegt in der gegenüber Sekundärbatterien höheren Energiedichte. Diese ist realisierbar, weil sie im Gegensatz zu Sekundärzellen nur auf eine einmalige nicht reversible Reaktion ausgelegt sind.

Wir kennen sie in Form der allseits geläufigen AA- und AAA-Batterien im Heimanwenderbereich. Die überragende Lebensdauer, hohe Standfestigkeit und Leistungsdichte der Primärzellen prädestinieren sie jedoch für hochspezialisierte Anwendungen in der Medizin- und Militärtechnik. Beispielhaft zu erwähnen ist der Einsatz in Herzschrittmachern oder Hörgeräten. [9]

Die Sekundärzelle

Als Sekundärzellen werden galvanische Elemente bezeichnet, die im Gegensatz zu Primärzellen wieder aufladbar und somit nicht nur einmalig verwendbar sind. Durch das Anlegen einer Spannung kann die bei der Energieabgabe ablaufende chemische Reaktion umgekehrt werden. Dieser Umkehrprozess ist allerdings nicht beliebig oft wiederholbar, sondern von mehreren Faktoren limitiert. So nehmen Kapazität und Ladespannung der Zelle mit zunehmender Zahl von Lade- und Entladevorgängen ab. Die Zyklenfestigkeit ist dabei stark von der Art des eingesetzten Chemismus abhängig. Mit Anzahl der Ladevorgänge ist auch ein sukzessiv steigender Innenwiderstand zu beobachten, der auf Dauer die abrufbare Stromstärke reduziert.

Bei der in meinem Projekt verwendeten Zelle handelt es sich um eine Sekundärzelle auf Bleisäure-Basis, weshalb ich in den weiter unten angeführten Kapiteln 2.3 Akkumulatoren und 3. Die Blei-Säure Zelle genauer auf diesen Typ eingehen werde.

Die Tertiärzelle

Die Tertiärzelle, besser bekannt als Brennstoffzelle, bildet die dritte Kategorie in der Gruppe der galvanischen Zellen. Sie unterscheidet sich von den anderen Typen darin, dass die chemische Energie in Form der Reaktanden nicht schon bei Herstellung gegeben ist, sondern während dem Betrieb kontinuierlich von außen zugeführt werden muss. Obwohl die Grundlage der Brennstoffzelle bereits um 1838 entdeckt wurde, ist sie auch heute noch wenig verbreitet. Der Grund dafür liegt im komplexen Handling im Alltagseinsatz und dem hohen Energieaufwand bei der Erzeugung der Reaktanden. So werden in der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle die zwei Ausgangsstoffe Wasserstoff als Brennstoff und Sauerstoff als Oxidationsmittel zur Reaktion gebracht, um elektrischen Strom zu erzeugen. Als Reaktionsprodukt liegt am Ende reines Wasser vor, was dieses Konzept im Zusammenhang mit dem Ausbau erneuerbarer Energien sehr interessant als potenziellen zukünftigen Energiespeicher macht. Alternativ können als Brennstoffe verschiedene Alkohole und Kohlenwasserstoffe wie z.B. Erdgas eingesetzt werden. Der Forschungsschwerpunkt liegt allerdings auf der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle. Preis und Verfügbarkeit der verwendeten Reaktanden erklären auch das breite wissenschaftliche und ökonomische Interesse an der Brennstoffzelle auf Wasserstoffbasis. [10]

Allen aktuell in Verwendung befindlichen Varianten der Brennstoffzelle ist gemein, dass sie auf einem sehr hohen Temperaturniveau arbeiten, angefangen bei der Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle mit einer Betriebstemperatur über 60°C bis hin zur Festoxid-Brennstoffzelle mit

Einsatztemperaturen bis zu 1000°C. Diese Temperaturen erschweren den alltäglichen Einsatz in Consumeranwendungen aktuell noch sehr stark. [15]

Mit einem Anschaffungspreis von mehreren Tausend Euro/kW Leistungskapazität wird der Durchbruch der Brennstoffzelle wegen der Investitionskosten noch auf sich warten lassen, bis die Fertigung der Zelle an sich, deren Lebensdauer, Herstellung der Reaktanden und der Ausbau der Versorgungsinfrastruktur ökonomisch vertretbar sind.

In der Gesamtbetrachtung ist offensichtlich, dass es sich bei der Tertiärzelle weniger um einen Energiespeicher im herkömmlichen Sinn als vielmehr um einen Energiewandler handelt. Die angeführte Visualisierung verdeutlicht in vereinfachter Form die Wirkungsweise und Abgrenzung elektrochemischer Energiespeicher und Wandler der unterschiedlichen Zelltypen. [11]

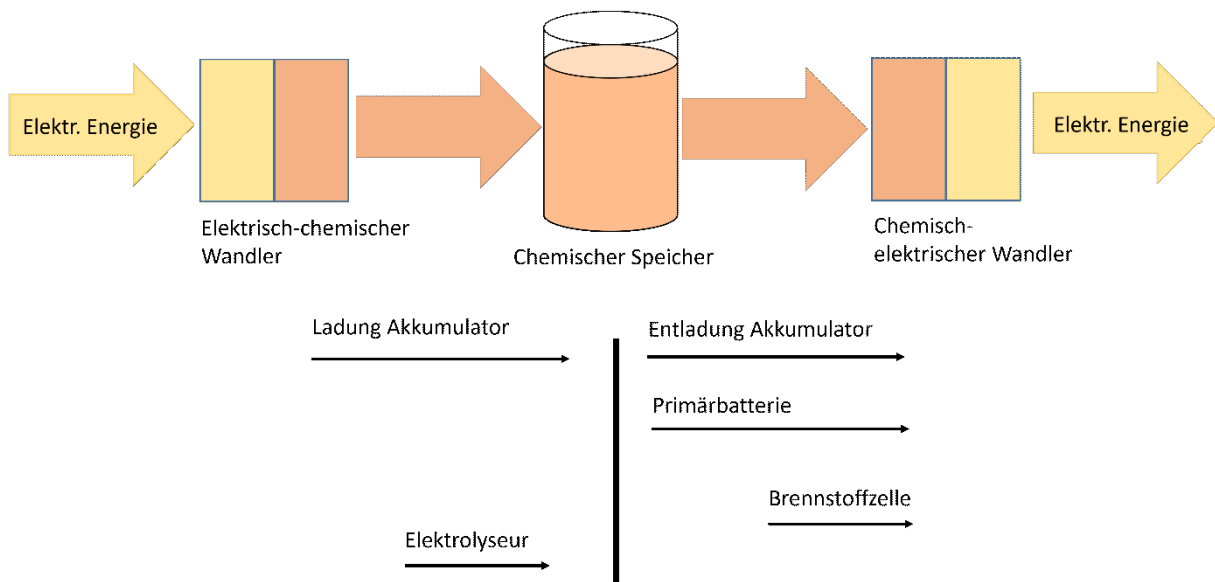


Abbildung 2-5: Abgrenzung chemischer und elektrischer Speicher im Überblick nach [10]

2.3 Akkumulatoren

Jede Batterie besteht aus einer oder einem Zusammenschluss einzelner galvanischer Zellen, wobei nicht näher definiert ist, ob es sich dabei um nicht aufladbare Primärzellen oder wieder aufladbare Sekundärzellen handelt. Umgangssprachlich hat sich die Bezeichnung „Batterie“ allerdings als Synonym für Primärzellen durchgesetzt, während Sekundärzellen als Akkumulatoren bezeichnet werden. Wie bereits zuvor beschrieben kann bei Akkumulatoren die Entladereaktion durch das Anlegen einer äußeren Spannung umgekehrt werden. Elektrische Energie wird dabei in chemische umgewandelt und die Zelle wird wieder für die weitere Verwendung geladen. Problematisch ist die im Vergleich zu Primärzellen geringere Energiedichte von Akkumulatoren. Dies ist den höheren Anforderungen an die Zellchemie geschuldet, da diese wesentlich robuster sein muss, um die Qualität in der Speicherung und Energieabgabe über die gesamte Lebensdauer und unzählige Ladezyklen hinweg zu gewährleisten. Die notwendige Betriebsspannung wird deshalb durch die serielle Verschaltung einzelner Zellen im Verbund erreicht. Auch der Fokus von Forschung und Entwicklung liegt aktuell vor allem auf der Steigerung von Energiedichte und Zyklenfestigkeit, um so den Durchbruch in der Elektromobilität durch erhöhte Praktikabilität und mehr Komfort im Alltag zu unterstützen. Bedingt durch das Erneuerbare Energie Ausbau Gesetz und generell die Pläne zur Energiewende in der Europäischen Union wird die Bedeutung von Akkumulatoren als Heimenergiespeicher oder generell als dezentrales Speichersystem zur Netzstabilisierung an Bedeutung gewinnen. [6]

Die Unterschiede in den wesentlichen Charakteristika der Akkumulatoren sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

		Blei	NiCd	NiMH	NiZn	Li	NaS
Energiedichte	[Wh/kg]	35	55	70	75	120	200
Volumetrische Energiedichte	[Wh/ l]	100	150	250	150	300	180
Leistungsdichte	[W/kg]	100	200	200	200	200	200
Volumetrische Leistungsdichte	[W/ l]	150- 300	400- 500	250- 500	250- 400	250- 500	140
Speicherwirkungsgrad	[%]	85	70- 75	60-80	70-75	90	90
Realisierte Zellkapazitäten	[Ah]	100	15	12	100	1	30

Tabelle 2: Charakteristika chemischer Energiespeicher nach [13]

Der Vergleich der Akkuvarianten macht deutlich, dass es im Einsatz von Akkumulatoren zum jetzigen Stand der Technik noch keine Pauschallösung gibt. Die Auswahl des verwendeten Typs erfolgt nach dem gewählten Anwendungsfeld. Während der Bleiakkumulator in den Anfängen der Elektromobilität noch als Traktionsbatterie Verwendung gefunden hat, dient er im Automobilbereich heutzutage nur mehr als Starterbatterie für herkömmliche Verbrennungskraftfahrzeuge.

Lange Zeit hat der Blei-Säure Akku den Bereich der mobilen Energiespeicher dominiert. Ausschlaggebend dafür sind vor allem seine Robustheit und die niedrigen Herstellungskosten gewesen. Erst in den letzten Jahren haben die zunehmende Verbreitung von Elektromobilität und dezentraler erneuerbarer Energieversorgung zu einer Abkehr von Blei-Säure-Zellen geführt. Speicherlösungen mit höherer Energiedichte sind notwendig, um diese Aufgabengebiete in der Zukunft bedienen zu können. Mit höherer Energie- und Leistungsdichte steigt allerdings auch das Gefahrenpotential der Zellen im Fehlerfall und macht sie somit für gewisse Anwendungen, wie hier den Einsatz an einer Förderanlage, unbrauchbar.

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick charakteristischer Eigenschaften verschiedener Akkutypen.

Eigenschaften	Pb	Li-ion	Ni-MH	Ni-Cd
Nennspannung [V]	2,1	3,6	1,2	1,2
Energiedichte [Wh/kg]	40	200	100	50
Zyklusfestigkeit	2000	1000	1000	1000
Temperaturbereich Entladung [°C]	-20 bis +40°C	-25 bis +60°C	0 bis +50°C	-40 bis +30°C

Tabelle 3: Eigenschaften unterschiedlicher Akkumulatoren [8]

In meinem Projekt wird ein Akkumulator auf Blei-Säure-Basis verwendet. Dieser erlaubt durch seine konservative Auslegung einen sicheren Betrieb im unmittelbaren Bereich der Ex-Zone der OMV Förderanlage Bockfließ 1.

2.3.1 Gefahren & Fehlerpotential

Der Einsatz von chemischen Energiespeichern bringt spezielle Risiken mit sich, die es bei der Auslegung eines elektrischen Versorgungssystems zu berücksichtigen gilt. Vermehrte Medienberichte von verunfallten Elektrofahrzeugen verdeutlichen sehr gut, welche enorme Energiemenge die spontane und unkontrollierte Entladung von Akkumulatoren und Lithium-Ionen-Batterien im Speziellen freisetzen kann. Beim Thermal-Runaway von Lithium-Zellen kommt es zu einem sich selbst verstärkenden Zellbrand mit Temperaturen über 400°C. Der Löschvorgang gestaltet sich in so einem Fall besonders schwierig, weil die Temperatur der beschädigten Zellen in einem Akkumulator selbst nach dem Ersticken des Feuers so hoch sein kann, dass es noch mehrmals zu einem neuerlichen Entflammen der Zellen kommt.

Bei Blei-Säure-Akkumulatoren sind die Risiken im Fehlerfall weit weniger drastisch und auch einfacher zu kontrollieren. Trotzdem gilt es folgende Fehlerfälle durch korrekte Handhabung und angepasste Betriebsart zu vermeiden

- **Mechanische Beschädigung:** Durch Deformation des Gehäuses oder Eindringen eines Fremdkörpers durch das Batteriegehäuse kommt es zur mechanischen Beschädigung der Zellen. Schafft ein eingedrungener Teil eine Kontaktierung innerhalb der Zelle, kommt es zum Kurzschlussfall. Der Kurzschluss kann zum thermischen Durchgehen und der Zerstörung der Zelle führen.
- **Thermische Einwirkung:** Wie in der oben angeführten Tabelle ersichtlich sind die verschiedenen Zelltypen aufgrund der zugrundeliegenden Chemismen für unterschiedliche Temperaturbereiche konzipiert beziehungsweise geeignet. Wird eine Zelle außerhalb der vorgesehenen Betriebstemperatur eingesetzt resultiert dies bei zu tiefen Temperaturen unter anderem in verringerter Leistungsabgabe und mangelnder Kapazität. Zu hohe Temperaturen können das Ausdampfen des Elektrolyten bewirken und so die Zelle langfristig schädigen. Eine Überhitzung kann in weiterer Folge sogar Zellbrände auslösen.
- **Kurzschluss:** Im Kurzschlussfall besteht eine direkte leitende Verbindung zwischen den Elektroden der Zelle. Innerhalb kurzer Zeit fließt die maximal mögliche Energiemenge über diese Verbindung und führt zur Zerstörung der Zelle. Ein Brand kann in diesem Fall nicht ausgeschlossen werden.
- **Tiefentladung:** Durch intensiven Gebrauch oder auch durch Vorgänge der Selbstentladung sinkt die Zellspannung unter die Entladeschlussspannung ab. In diesem Zustand kommt es zur Beeinträchtigung des aktiven Zellmaterials. Was Kapazitätsverlust und irreversible Schäden an den Zellbestandteilen mit sich bringt. In einem Akkumulator mit in Reihe verbundenen Zellen reicht bereits eine tiefenentladene Zelle aus um das ganze System unbrauchbar zu machen. Moderne Batteriemanagementsysteme erlauben daher nur eine Entladung auf 10% der

eigentlichen Nennkapazität und verhindern so eine zerstörende Entladung des Gesamtsystems selbst bei längeren Stillständen.

- **Überladung:** Der Ladevorgang wird über das Erreichen der Ladeschlussspannung der Zelle hinaus fortgesetzt. Die weiterhin zugeführte Energiemenge kann nicht mehr in die ursprünglichen Reaktanden für die Zellreaktion umgesetzt werden, da es schlicht an Ausgangsmaterial für die Reaktion fehlt. Stattdessen wird der Energieüberschuss in Wärme übergeführt, schädigt dadurch die Zellbestandteile und wird in Folge zum Batteriebrand führen. Ebenso tritt verstärkte Korrosion an den Elektroden, auf welche in weiterer Folge sukzessive die nutzbare Speicherkapazität reduziert. Aktive Batteriemanagementsysteme verhindern dieses Szenario, indem der Ladestrom vor Erreichen der Vollladung kontinuierlich zurückgefahren oder komplett abgeschaltet wird.
- **Fehlendes Battery Balancing:** Akkumulatoren bestehen aus miteinander verschalteten Einzelzellen. Beim Laden des Akkus verhalten sich diese Zellen aufgrund feinsten Unterschiede im Inneren der Zelle nicht vollkommen identisch, wodurch manche schneller andere langsamer geladen werden. So ergibt es sich, dass eine einzelne Zelle bereits ihre maximale Kapazität und damit die Ladeschlussspannung erreicht hat, während die anderen im Verbund noch weiter geladen werden müssen, um die vollständige Kapazität des Akkus zu erreichen. Ohne das Eingreifen eines Balancingsystems wird die bereits volle Zelle weiter mit dem vollen Ladestrom beaufschlagt und durch den zuvor beschriebenen Überladungsprozess sukzessive zerstört. Einfache Batteriemanagementsysteme ohne Balancing können den Ladestrom abschalten, sobald die erste Zelle vollgeladen ist. Dies beeinträchtigt allerdings die zu Verfügung stehende Kapazität des Akkumulators, da der Ladevorgang beendet ist, sobald eine Zelle im gesamten Verbund ihre maximale Kapazität erreicht hat. Auf die Funktion und Arten von Balancingsystemen werde ich im nächsten Kapitel meiner Arbeit detaillierter eingehen.

Insgesamt verdeutlichen die oben beschriebenen Szenarien sehr gut, wie diffizil der Einsatz von Batterietechnik im Allgemeinen ist. Nichtsdestotrotz ist diese Form der Energiespeicherung aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Dementsprechend sorgfältig muss die Auswahl des richtigen Akkutyps bereits im Vorfeld geplant werden, um einen sicheren und langlebigen Einsatz zu garantieren.

2.4 Der Bleiakkumulator

Bei dem für mein Projekt gewählten Akkumulator handelt es sich um eine Blei-Säure-Zelle der Marke Oerlikon. Die genauen Spezifikationen sind im Datenblatt im Anhang ersichtlich.

Die Erfindung der Blei-Säure-Zelle geht auf das späte 19. Jahrhundert zurück. Zusammen mit Nickel-Cadmium- und Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren stellt die Blei-Säure-Zelle noch heute eine der am weitest verbreiteten Zellvarianten dar. Erst durch die rasanten Fortschritte der letzten Jahre in der Lithium-Ionen-Technik nimmt die Verwendung von Blei-Säure Akkus sukzessive ab. Letztendlich wird der eingesetzte Zelltyp von den geplanten bzw. vorherrschenden Einsatzbedingungen einschließlich der Vorgaben durch die Geräte (z.B. USV) definiert.

Dabei überwiegen im vorherrschenden Versuchsaufbau die Vorteile der Blei-Säure-Zelle deutlich. Die Feldanwendung am Förderplatz Bockfließ 1, Niederösterreich, der OMV lässt den Einsatz eines Lithium-Ionen-Akkus nicht zu. Die Anlage befindet an einem Bohrloch inmitten einer Ackerlandschaft. Hier ist der Versuchsaufbau, nur von einem herkömmlichen Baucontainer geschützt, direkt am Bohrplatz positioniert. Extreme Hitze im Container über die Sommermonate und Kälte in der Winterperiode belasten die Elektronik sowie den Energiespeicher und machen damit ein robustes Design des Equipments unabdingbar. Hinzu kommt, dass die Positionierung am Bohrplatz im unmittelbaren Bereich der Ex-Zone auch spezielle Sicherheitsanforderungen an das System stellt. Bedingt dadurch habe ich als Energiespeicher auf einen Blei-Säure-Akku gesetzt. Die Lithium-Ionen-Basis bietet zwar im direkten Vergleich eine wesentliche höhere Energiedichte, doch benötigen Lithium-Ionen-Akkus ein komplexes elektronisches Batteriemanagementsystem, das nicht robust genug für den Einsatz im Feld ist. Hinzu kommt noch der Sicherheitsaspekt. Im Fehlerfall kann es bei Lithium-Ionen Zellen zum Thermal Runaway kommen. Dabei gehen defekte Zellen in einem Akkupaket durch und zellinterne Sicherheitsmechanismen greifen nicht mehr. Der entstehende Metallbrand mit Verbrennungstemperaturen von bis zu 680°C ist mit herkömmlichen Löschmitteln nicht zu ersticken und auch nach erfolgter Löschung können sich beschädigte Zellen im inneren des Akkupakets wieder entzünden.

2.4.1 Aufbau der Blei-Säure-Zelle

Wie schon zuvor beschrieben besteht eine Blei-Säure-Zelle äquivalent zu anderen Varianten des Daniell-Elements aus zwei Elektroden unterschiedlicher Polarität (Kathoden- und Anodenteil), welche durch eine semipermeable Membran, dem Separator, voneinander getrennt werden und in einem Elektrolyten aus Schwefelsäure getaucht sind. [9]

Kathode

Das positive Elektrodenmaterial in einer Blei-Säure-Zelle besteht aus porösem Bleidioxid (PbO_2), mit einer Porosität von 55-60% bei 0,6-1,2 μm . Die Poren vergrößern die Oberfläche des aktiven Materials und verbessern somit die Reaktivität der Elektroden.

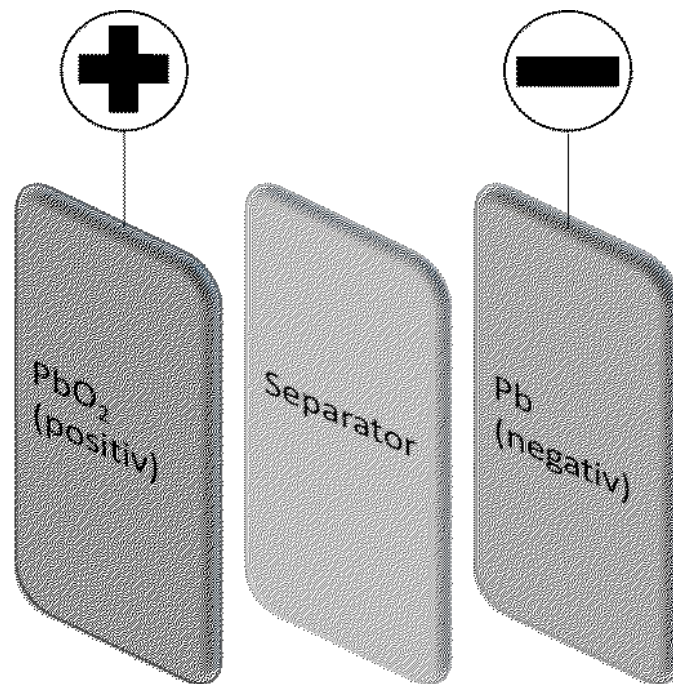


Abbildung 2-6 Elektrodenkonfiguration in der Blei-Säure-Zelle

Anode

Die negative Elektrode besteht aus porösem, metallischen Blei (Pb). Die Porosität bewegt sich im Bereich von 55-60%, wobei die Poren eine Größe von 1-3 μm aufweisen. Die Zugabe von Ruß und organischen Materialien erhöht die elektrische Leitfähigkeit zusätzlich, da die Anode ausschlaggebend für die Funktion des Blei Akkus bei tiefen Temperaturen, also etwa dem Kaltstartverhalten von Starterbatterien, ist. [11] [12]

Die porösen Strukturen von Kathode und Anode verbessern die Performance von Bleiakkumulatoren hinsichtlich Leitfähigkeit und Energiedichte und tragen darüber hinaus zu einem niedrigen Innenwiderstand der Zelle bei. Negativ wirkt sich die Porosität hingegen auf die strukturelle Widerstandsfähigkeit der Elektroden über die Lebensdauer aus. Zusätze aus Fasermaterialien wie Lignin oder Glasfaser werden als sogenannte Expander bezeichnet und sollen für die notwendige Stabilität sorgen. Zusätzlich soll die Bauform der Elektroden zur besseren Haltbarkeit beitragen. Zum Einsatz kommen in den heutzutage geläufigen Akkumulatoren Elektroden in Form von Gitterplatten und Panzerplatten.

Bei der Gitterplatte wird das aktive Material der Elektrode in Form einer Paste in die Zwischenräume eines gegossenen oder gestanzten Gitters, das als Stromableiter dient, eingebracht. Durch eine Formationsladung am Ende des Fertigungsprozesses wird die reaktive Masse dann aktiviert. Anoden werden immer als Gitterplatte ausgeführt.

Eine Alternative dazu stellt die Panzerplatte, auch Röhrchenplatte genannt, dar. Dabei handelt es sich um eine Elektrodenbauweise, bei der Polyethylen- oder Vlies-Röhrchen zu einer Platte miteinander verbunden werden. In diese Röhrchen werden in weiterer Folge Ableiterelektroden und aktive Masse eingebracht, ehe sie versiegelt werden. Die Röhrchenstruktur verleiht der Zelle zusätzliche Stabilität und macht sie widerstandsfähiger im zyklischen Betrieb. Aufgrund des höheren Innenwiderstands wird diese Bauform nicht als Starterbatterie oder in Hochstromanwendungen eingesetzt. [10]

Separator

Ein üblicher kommerziell eingesetzter Akku ist aus einer dichten Aneinanderreihung der zuvor beschriebenen positiven und negativen Elektrodenplatten aufgebaut. Getrennt werden diese durch eine dünne elektrisch-isolierende Separatorschicht. Neben der elektrischen Isolation stellt der Separator auch einen gleichbleibend konstanten Abstand zwischen den Anoden- und Kathodenplatten ein und fixiert diese so im Gehäuse. Anfänglich wurden Cellulose (Holz) und später Polyvinylchlorid (PVC) als Separatormaterial eingesetzt. Heute bestehen diese zur besseren Ionenleitung aus mikroporösen Kunststoffen mit Porengrößen zwischen 0,2 µm und 1,0 µm. Darüber hinaus werden die Separatoren in modernen Bleiakkumulatoren nicht mehr nur zwischen Kathode und Anode gelegt, sondern wie eine Tasche um die positive Elektrode gestülpt. Die Verwendung dieser sogenannten Taschenseparatoren verhindert, dass abbröckelndes Aktivmaterial durch Kontaktierung der Elektroden zum Kurzschluss in der Zelle führt. [10]

Elektrolyt

Die aus drei Platten bestehenden Zellelemente werden in weiterer Folge zu Stacks verbunden und diese Stacks wiederum in ein Kunststoffgehäuse eingebettet und versiegelt, sodass sich daraus ein Akkumulator, wie in jedem Verbrennungskraftfahrzeug als Starterbatterie eingesetzt, ergibt. Eingebracht in das Gehäuse wird der gesamte Aufbau aus Kathode, Anode und Separation, von einem Elektrolyten aus verdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4) umgeben. Beim Bleiakkumulator ist der Elektrolyt an der Zellreaktion beteiligt. Die Konzentration der Schwefelsäure in der Lösung nimmt dementsprechend direkt proportional zur entnommenen Energiemenge ab. Bei der Auslegung der Elektrolytlösung muss die Säurekonzentration hoch genug sein, um ausreichend ionische Leitfähigkeit sicherzustellen. Ist der Säuregehalt in der Lösung allerdings zu hoch, kommt es zu Korrosionsschäden am Aktivmaterial. [12]

Bei der Verwendung von geschlossenen Bleiakkumulatoren liegt der Elektrolyt gänzlich in flüssiger Form vor und kann im Betrieb in Form von Wasserstoff und Sauerstoff ausgasen. Das verbrauchte Wasser muss rechtzeitig nachgefüllt werden, damit das Aktivmaterial nicht beschädigt und der Akku zerstört wird.

Da geschlossene Bleiakumulatoren nicht lageunabhängig eingesetzt werden können, wurden offene Systeme entwickelt, bei denen der Elektrolyt in Form eines Gels oder gebunden in einem Vlies vorliegt. Diese Varianten können beliebig positioniert werden ohne, dass es zum Austritt von Elektrolytmaterial kommt. Ebenso entfällt das Nachfüllen von Wasser, da der bei der Verwendung entstehende Sauerstoff und Wasserstoff mit Hilfe von Katalysatoren wieder in Wasser rückgewandelt und über Kanäle im Inneren des Batteriegehäuses rückgeführt werden.

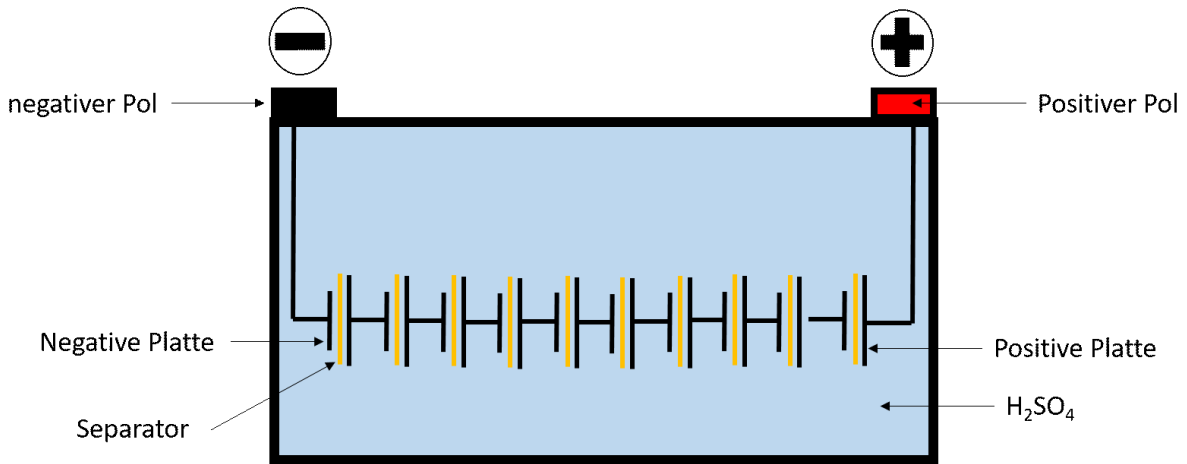


Abbildung 2-7: vereinfachter Aufbau der fertigen Batterieeinheit

2.4.2 Lade- und Entladevorgang

Hauptreaktion der Entladung

Wird eine Last in Form eines externen Verbrauchers an die Batterie angeschlossen, wird der Stromkreis geschlossen und der Entladeprozess wird wie untenstehend abgebildet in Gang gesetzt. Aus chemischer Energie wird elektrische Energie.

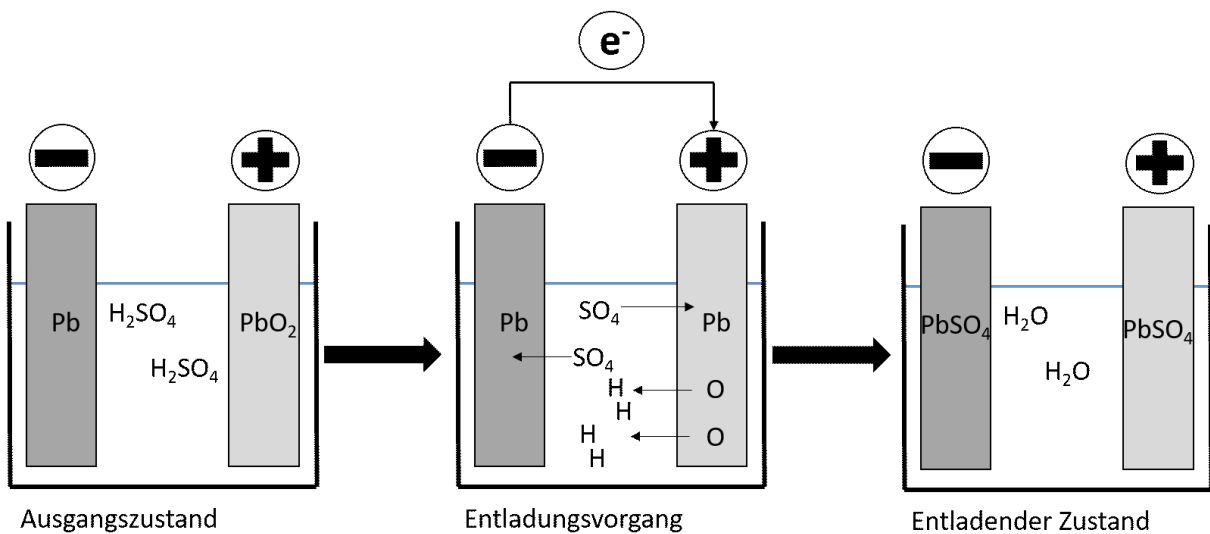


Abbildung 2-8: Ablauf der Entladungsreaktion

Dabei wandern Elektronen von der negativen Elektrode über den Verbraucher bzw. die Last zur positiven Elektrode. Damit diese Elektronen an der Anode frei werden, muss das metallische Blei in Lösung gehen. Die freien Blei-Ionen reagieren mit den Sulfat-Ionen der Schwefelsäure des Elektrolyten. Aus dieser Reaktion bildet sich Bleisulfat (PbSO_4), das sich in fester Form an der negativen Elektrode abscheidet.

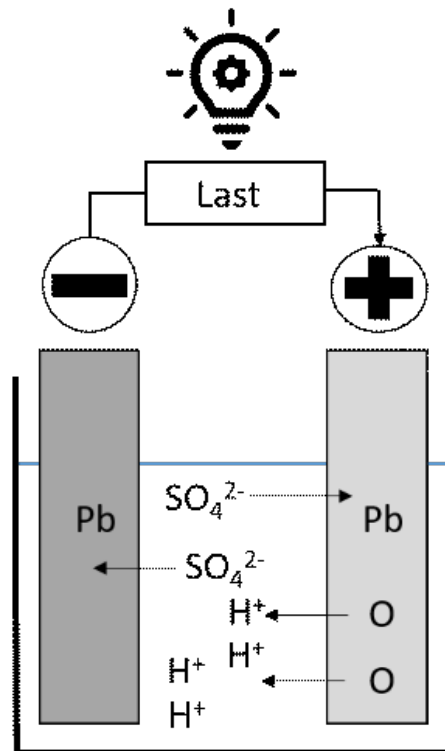


Abbildung 2-9: Energieabgabe der Blei-Säure-Zelle

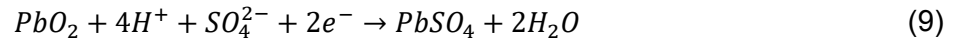
An der positiven Elektrode muss das Aktivmaterial aus Bleidioxid (PbO_2) seinen Sauerstoff O_2 abgeben, damit die frei gewordenen Elektronen, die über den Verbraucher von der Anode zur Kathode wandern, aufgenommen werden können. Dieser Sauerstoff reagiert mit den Wasserstoff-Ionen aus der Elektrolytlösung zu Wasser. Der notwendige ionische Ladungsausgleich erfolgt, weil der Elektrolyt aus verdünnter Schwefelsäure H_2SO_4 selbst an der Reaktion teilnimmt, indem er sich in positiv geladene Wasserstoffionen H^+ und negative geladene Sulfationen SO_4^{2-} aufspaltet. Das in der Kathode verbleibende Blei bildet zusammen mit den übrigen Sulfationen aus dem Elektrolyten wiederum festes Bleisulfat.

Die Nennspannung der Entladungsreaktion beträgt 2,05V und die zugrundeliegenden Reaktionsgleichungen sehen folgendermaßen aus:

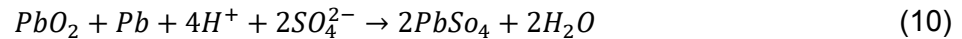
Negative Elektrode:



Positive Elektrode:



Gesamtreaktion:



$$E_0 = +2,048 V$$

Mit voranschreitender Entladung verschlechtern sich die elektrischen Eigenschaften des Bleiakкумуляtors sukzessive durch die abnehmende Konzentration der Schwefelsäure im Elektrolyten, solange bis die Entladeschlussspannung von 1,75 V erreicht ist. Danach gilt der Akkumulator als vollständig entladen und an beiden Elektroden liegt festes Bleisulfat vor. Die verbleibende Konzentration von Schwefelsäure in der Elektrolytlösung ist dabei so gering, dass keine weitere nennenswerte Energieabgabe durch die Zelle stattfinden kann. [13]

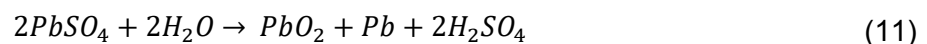
Das während der Entladungsreaktion entstehende Bleisulfat beeinträchtigt die Energieabgabe der Zelle, da es ein schlechter elektrischer Leiter ist und mit der Ablagerung an den Elektroden deren reaktives Porenvolumen verringert. [11] [12]

Selbstentladung

Zusätzlich zur angeführten Hauptreaktion findet eine parasitäre Nebenreaktion statt. In dieser kommt es mittels Elektrolyse zur Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Die notwendige Energie für diese Nebenreaktion kann sowohl von einer Überladung als auch von der Zelle selbst durch Entladung des Aktivmaterials aufgebracht werden. In letzterem Fall, der sogenannten Selbstentladung, verringert sich der Ladestand des Akkumulators monatlich um bis zu 20%, weshalb regelmäßiges Regenerationsladen empfohlen wird. [10] [11]

Ladevorgang

Bei Anlegen einer externen Spannung an die Zelle läuft die oben gezeigte Reaktion in die entgegengesetzte Richtung ab und der Akku wird wieder geladen. Es bilden sich wieder Bleidioxid als Kathodenmaterial und reines Blei als Anode aus. Entsprechend sieht die Reaktionsgleichung aus:



Beim Aufladen ist zu berücksichtigen, dass ein Überladen der Zelle vermieden wird. Bleibt eine höhere externe Spannung nach Erreichen eines State of Charge von 100 % angelegt, kommt es zur Zersetzung des Elektrolyten. Das Wasser aus dem Elektrolyten wird durch die gasförmigen Komponenten 2H_2 und O_2 verringert und die Sulfatkonzentration in der Zelle steigt. Die Kapazität und die Leistungsfähigkeit der Zelle werden dadurch reduziert. Zellen, die als offenes System konzipiert sind, können mit destilliertem Wasser aufgefüllt werden, um die Konzentration des Elektrolyten zu stabilisieren. Zur Kontrolle kann bei offenen Systemen die Dichte des Elektrolyten gemessen werden. Bei einer vollgeladenen Blei-Säure-Zelle soll diese im Bereich von 1,27g/ml bis 1,30g/ml liegen. Generell besteht eine Besonderheit von Bleiakкумуляtoren darin, dass der Ladezustand der Zelle anhand der Konzentration der verdünnten Schwefelsäure im Elektrolyten bzw. der Dichte des Elektrolyten bestimmt werden kann.

Bei Bleiakкумуляtoren verschlossener Bauweise haben die verbauten Zellen keinen Kontakt zur Außenwelt. Im Gegensatz zur offenen Bauform kann der Ladestand nicht über Entnahme einer Elektrolytprobe bestimmt werden. Das Auffüllen mit destilliertem Wasser entfällt aufgrund der batterieinternen Rekombination. Die bei der Überladung entstehende Gasphase aus Wasserstoff und Sauerstoff verlässt das Batteriegehäuse nicht, sondern wird über interne Kanäle in die Zelle rückgeführt. Dennoch gilt es auch bei dieser Bauform die Elektrolyse der Elektrolytlösung durch Überladung zu vermeiden, da die zellinterne Regeneration über die im Gehäuse integrierten Strömungskanäle nicht vollständig abläuft.

Als ideales Ladeverfahren für Bleiakкумуляtoren wird in der Literatur auf Empfehlung der Zellhersteller Panasonic und Yuasa das Ladeverfahren mit IU-Kennlinie, statt Konstantstromladung, empfohlen. Diese Methode schont die Zellen indem zu Beginn mit konstantem, aber begrenztem Strom geladen wird, ehe die Zelle mit konstanter Spannung weiter geladen wird. Bei dieser Variante wird die Zelle nicht durch überhöhte Stromzufuhr und dem damit verbundenen Temperaturanstieg im Inneren belastet. Eine angemessen hohe Ladespannung dagegen ist für die Vollladung der Zelle unbedingt notwendig. Nachstehend noch die Darstellung der Kennlinie des IU-Ladeverfahrens. [11]

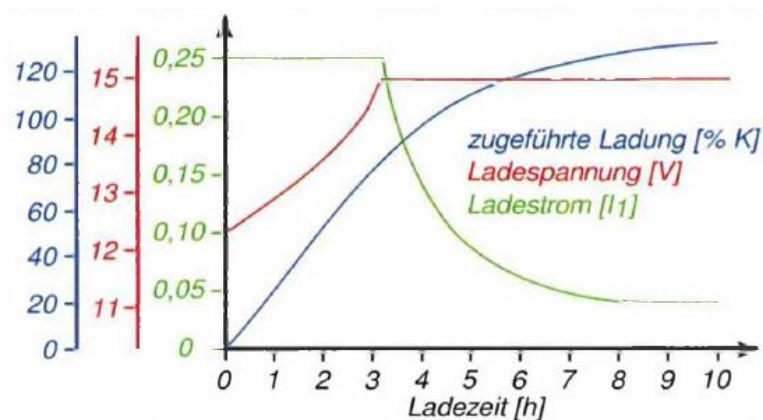


Abbildung 2-10: Ablauf des IU-Ladeverfahrens für Bleiakкумуляtoren nach[11]

2.4.3 Bleisäurespezifische Zelldefekte und Fehlerfälle

Generell können bei Bleiakkumulatoren dieselben Defekte auftreten, die ich bereits zuvor unter Kapitel 2.3.1 Gefahren und Fehlerpotentiale für die Verwendung von galvanischen Zellen im Allgemeinen angeführt habe. Natürlich bestehen je nach eingesetztem Chemismus noch unterschiedliche bzw. typspezifische Defekte. Durch den wässrigen Elektrolyten bei Bleiakkumulatoren kann dieser nicht brennen wie bei Lithium-Ionen-Batterien, doch bildet sich bei der Elektrolyse ein hochexplosives Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch.

Bei der Erzeugung von Bleiakkus werden gemeinhin widerstandsfähige Legierungen eingesetzt, um eine möglichst hohe Lebensdauer und Zyklenfestigkeit zu erreichen. Auch die Schichtstärke und andere Designparameter wie Platten- vs. Gitterelektroden sollen die Widerstandsfähigkeit der Zelle positiv beeinflussen. Trotzdem gibt es einige negative Einwirkungen, die den vorzeitigen Ausfall der Zelle mit sich bringen. Im Folgenden ein Überblick über die häufigsten Fehlerursachen.

Gitter- bzw. Elektrodenfehler

Durch Überladung kommt es zu Korrosion an der positiven Elektrode. Infolgedessen verringert sich das aktive Reaktionsmaterial der Zelle und die Kapazität nimmt über die Lebensdauer sukzessive ab. Auch das Einstellen einer zu hohen Ladespannung kann die Korrosion des Elektrodenmaterials beschleunigen.

Mit zunehmendem Alter der Zelle, aber auch durch Korrosionsprodukte, kann sich das Volumen des Zellmaterials erhöhen. Die volumetrische Ausdehnung innerhalb des Batteriegehäuses verursacht interne Kurzschlüsse, wenn sie so weit vorangeschritten ist, dass sich Kathoden- und Anodenmaterial berühren. Der Totalausfall der Zelle ist die Folge. [10]

Säureschichtung

Säureschichtung, auch bekannt als Stratifikation, tritt auf, wenn die Batterie nicht vollständig oder mit zu geringer Spannung geladen wird. Durch den Ladevorgang bereits umgewandelter Elektrolyt ordnet sich aufgrund der höheren Dichte der Schwefelsäure (1.83g/cm^3) im Vergleich zu Wasser (1g/cm^3) weiter unten an. Wird der Ladevorgang beendet, bevor der gesamte Elektrolyt vollständig umgesetzt ist, setzt sich der Elektrolyt höherer Dichte im unteren Bereich des Akkus ab. Nach oben hin ergeben sich Schichten mit abnehmender Säurekonzentration bzw. Dichte.

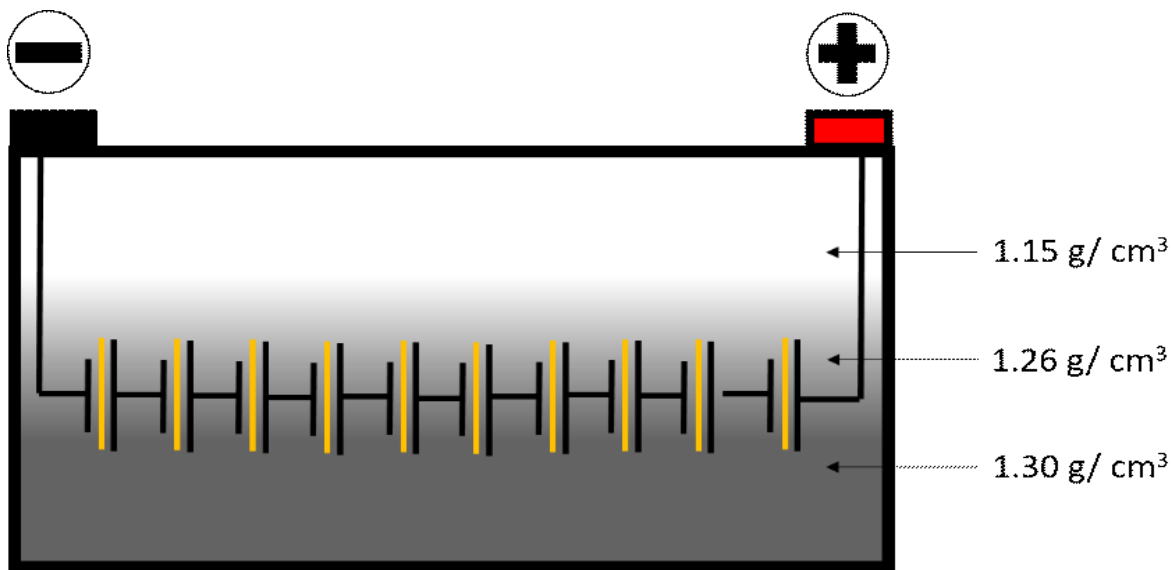


Abbildung 2-11: schematische Darstellung der Säureschichtung im Inneren von Bleiakкумуляtoren

Diese Schichtung reduziert entsprechend der Schwefelsäurekonzentration die Kapazität und Leistungsfähigkeit der Zelle, da Bereiche mit zu niedriger oder zu hoher Konzentration nicht mehr vollumfänglich zur Zellreaktion beitragen. Im industriellen Bereich gibt es daher Akkumulatoren, bei denen der Elektrolyt durch Pumpen umgewälzt wird. Im kleinen Maßstab werden Akkus auf Gel-Basis eingesetzt, bei denen es prinzipbedingt nicht zur Ausbildung solcher Schichten kommen kann. [10] Spezielle Ladeverfahren stellen mit Ende der Ladung eine definiert höhere Spannung ein (z.B. 2,4 V/Zelle), um beabsichtigt Elektrolyse in kurzem Zeitraum zu bewirken, wobei die aufsteigenden Gase eine Durchmischung des Elektrolyten ergeben. Es muss jedoch ein optimierter Kompromiss in der erhöhten Ladespannung und Überladedauer gefunden werden, der eine ausreichende Durchmischung bei geringer Elektrodenschädigung ergibt.

Sulfatierung

Wie in der Reaktionsgleichung weiter oben bereits veranschaulicht, bildet sich bei der Entladung des Akkus Bleisulfat. Dieses haftet in Form von Bleisulfatkristallen an den Oberflächen der Elektroden. Beim Ladevorgang werden diese Kristalle wieder aufgespalten und die ursprünglichen Reaktanten gebildet. Mit der Alterung der Zelle läuft dieser Aufspaltungsprozess zunehmend schlechter ab und das Ausgangsmaterial kann nicht wieder vollständig hergestellt werden. Stattdessen bilden sich immer größere Konglomerate von Bleisulfatkristallen an den Elektroden. Die aktive Oberfläche der Zelle wird somit reduziert und die Reaktionsfähigkeit weiter herabgesetzt, wodurch sich die Kristallisationsvorgang im Inneren selbst verstärkt. Dieser Ablauf wird zusätzlich beschleunigt, wenn sich die Zelle über einen längeren Zeitraum hinweg in einem partiell- oder tiefenentladenen Zustand befindet. [11]

2.4.4 Anwendungsgebiete für Bleiakkumulatoren

Wie die vorhergehenden Kapitel verdeutlichen, sind Bleiakkumulatoren keinesfalls so sorgenfrei in der Verwendung wie zum Beispiel die in der Militärtechnik oft eingesetzte Zebra-Batterien, die keine Selbstentladung aufweisen und darüber hinaus als wartungsfrei anzusehen sind. Trotzdem sprechen einige Faktoren für die noch immer weite Verbreitung von Akkumulatoren auf Blei-Säure-Basis. Diese kurz zusammengefasst lauten wie folgt:

- Hohe Nennspannung von 2,1V
- Einfache Beschaffung der Rohstoffe
- Geringe Anschaffungskosten (50€ / kWh)
- Hohe Sicherheit im Fehlerfall
- Eignung für zyklische Belastungen
- Robustheit und lange Lebensdauer
- Gute Recyclebarkeit

nach [11]

Aktuell werden Bleiakkumulatoren vermehrt als dezentrale Energiespeicher in Kombination mit privaten Photovoltaikanlagen eingesetzt. Die niedrigere Energiedichte im direkten Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien fällt bei stationären Anwendungen weniger ins Gewicht, während die niedrigen Kosten und der überschaubare Wartungsaufwand klar für den Bleiakkumulator sprechen. [13] Im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Technik gestaltet sich auch der Fehlerfall beherrschbar. Im Falle einer Überladung kommt es zur Zersetzung des Wassers im Elektrolyten, woraufhin dieses ausgast, ohne größere Schäden zu verursachen, sofern die Gase über einzelne Schläuche zur umfassenden Verdünnung ins Freie geleitet werden. Generell besteht keine Gefahr von Batteriebränden, da das System auf einer Wasserbasis aufbaut und selbst im Kurzschlussfall (Metallbrand) durch Kontaktierung der Elektroden keine hohen Temperaturen auftreten, die einen Zellbrand verursachen könnten, der bei Leichtmetallen sehr kritisch ausfällt. [14] [15]

2.4.5 Charakteristika Oerlikon 12CP50

Die von mir eingesetzten Oerlikon Blei-Säure Akkumulatoren haben ein luftdicht verschweißtes Kunststoffgehäuse mit geringen inneren Ausgangsöffnungen. Es gibt also kein Ventil über das der Wasserdampf im Falle einer Überladung austreten kann. Dieses Design verfügt über feine Kanäle im Inneren des Gehäuses in denen der entstandene Wasserdampf kondensiert und zurück in die Zellen geleitet wird. Ein Anschlussstutzen bietet die für sichere Verwendung in Innenräumen in größerer Stückzahl erforderliche Einrichtung, einen Ausgasungsschlauch mit sehr begrenztem inneren Volumen anzubringen, der das im Fehlerfall entstehende Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch zur vollständigen Verdünnung ins Freie leiten soll.

Die genaue Bezeichnung der Akkumulatoren lautet Oerlikon 12CP50 und weist damit auf eine Batteriespannung von 12V hin. Das erlaubt den Rückschluss, dass sich im Inneren des Batteriegehäuses sechs Blei-Zellen mit der für diesen Typus üblichen Zellspannung von 2V befinden. Die Elektroden sind in Form widerstandsfähiger Panzerplatten ausgeführt und die Nennkapazität der fertigen Batterieeinheit liegt bei 50 Ah. Die Batterien zählen zur Compact-Power-Rackline-Serie von Oerlikon und sind somit bereits ursprünglich als modularer stationärer Energiespeicher konzipiert gewesen. Oerlikon bewirbt die Rackline-Serie unter anderem für Hochtemperaturanwendungen oder als Speicher für Mobilfunksendestationen was diese Type für die Anwendung in meinem Versuchsaufbau prädestiniert. [38] Ergänzend wird festgehalten, dass die eingesetzte unterbrechungsfreie Stromversorgung für Bleiakkumulatoren entwickelt ist, auf diese abgestimmt und für diese zugelassen ist sowie den Anschluss externer Batterien zur Kapazitätserhöhung definiert ermöglicht. Die Oerlikon-Akkumulatoren sind in Reihe geschaltet an diesen externen Batterie-Hochstromkontakt angeschlossen.



Abbildung 2-12: Abbildung Oerlikon Rackline-Serie nach [38]



Abbildung 2-13: Außenansicht der Oerlikon 12CP50 Akkumulatoren

Jedes Array für den Feldversuch besteht aus einer Verbindung von sechs Oerlikon Bleibatterien. Damit wird eine Summenspannung von 72V bei einer Kapazität von 50Ah erreicht. Zwei solcher Arrays werden in weiterer Folge an der Förderanlage in Bockfließ in Kombination mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) der Firma EATON stationiert. Zwei Arrays verbleiben am Institut für Elektrotechnik der Montanuniversität Leoben für weitere Versuche und Tests meines Schaltungsaufbaus. Sie dienen darüber hinaus als Backup für die Akkupacks in Bockfließ oder können für den Aufbau einer weiteren Messeinheit an einer anderen Förderanlage der OMV eingesetzt werden.

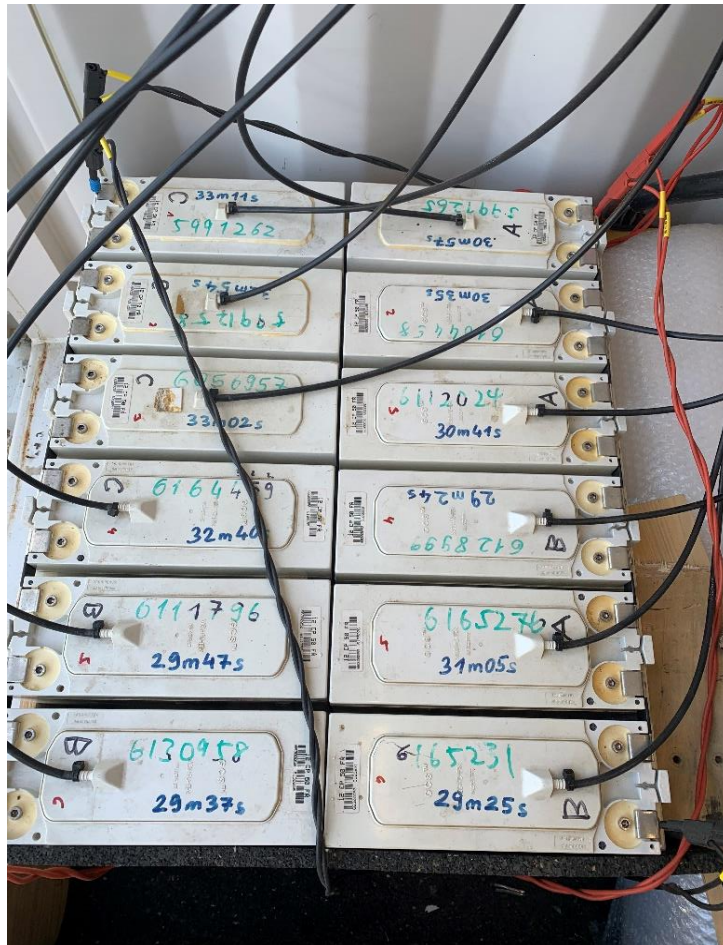


Abbildung 2-14: Aufnahme der fertig konfektionierten Arrays für Bockfließ 1

3 Balancing

Wie in den vorangehenden Ausführungen deutlich wird, stehen viele Fehler- und Gefahrenquellen beim Einsatz von Akkumulatoren im direkten Zusammenhang mit dem Ladevorgang und können infolgedessen durch „richtiges Laden“ vermieden werden. Hinzu kommt, dass der Einsatz von Akkumulatoren bzw. elektrochemischen Energiespeichern besonders attraktiv ist, wenn eine hohe nutzbare Kapazität geboten wird. Ebenso ist die Betriebssicherheit über die gesamte Lebensdauer des Speichermediums ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz. Zur Überwachung von Akkusystemen sind heutzutage sogenannte Batteriemanagementsysteme in die Akkupacks integriert beziehungsweise mit diesen kombiniert. Das Batteriemanagementsystem gewährleistet den sicheren Betrieb, indem es die Zellen vor Tiefenentladung und Überladung schützt, die Leistungsabgabe kontrolliert oder die korrekte Zelltemperatur überwacht. Das in der USV beinhaltete Batteriemangement-System beschränkt sich auf die Akkupack-Summenspannung als Informationsbasis für Maßnahmen gegen Tiefenentladung und Überladung. Das in der USV beinhaltete Batteriemangement-System beschränkt sich auf die Akkupack-Summenspannung als Informationsbasis für Maßnahmen gegen Tiefenentladung und Überladung.

Einen integralen Bestandteil eines weiter entwickelten Batteriemanagementsystems stellt das Battery Balancing dar. Ein Akkupack besteht in der Regel aus Stacks oder Einzelzellen, die in Serie oder parallel miteinander verbunden sind, um die notwendige Betriebsspannung zu erreichen. Zu Beginn der Lebensdauer steht dem Anwender damit die volle Kapazität des Akkupacks zu Verfügung. Üblicherweise besteht zudem eine eingestellte Lade- und Entladereserve von jeweils 10% am oberen und unteren Ende des SOC der Batterie. Diese Reserve soll die Zellen auch dann vor Überladung und Tiefenentladung schützen, wenn geringe (auch fertigungsbedingte) Unterschiede in der Kapazität bestehen. Mit zunehmender Beanspruchung und Zellalter nimmt die tatsächlich nutzbare Kapazität der Batterie jedoch ab. Diese Degradation betrifft nicht alle Zellen gleichermaßen, sondern kann von Zelle zu Zelle unterschiedlich stark ausfallen. Für den Anwender bedeutet das, dass die jeweils schwächste Zelle in der Serie die Gesamtkapazität des Zellverbunds bestimmt. Stark gealterte oder beschädigte Zellen können also die Performance eines Akkupacks drastisch verringern oder einen Totalausfall des Systems verursachen. Dieser Fehlerfall soll durch den Einsatz des Balancing-Systems ausgeschlossen werden. Auf die Wirkungsweise und den Einfluss eines solchen Systems werde ich in den folgenden Punkten näher eingehen.

3.1.1 Laden ohne Balancing

Jedes Akkupack besteht wie bereits beschrieben aus einem Verbund von in Serie verschalteten Einzelzellen. Obwohl der zugrundeliegende Chemismus der Zellen gleich ist, sind die Zellen nicht ident. Schon in der Herstellung können sich kleine Abweichungen ergeben oder Verunreinigungen eingebracht werden, die dann über die Lebensdauer des Akkus zu verschiedenen Anomalien führen. Dazu sind in der Grafik unten schematisch sechs Zellen eines fiktiven Akkupacks dargestellt. In der gegebenen Situation stellt die fünfte Zelle den limitierenden Faktor für den Akku dar, da sie die erste ist die einen Ladezustand (SOC) von

100% erreicht. Sobald die erste Zelle im Verbund vollständig geladen ist, muss der Ladevorgang automatisch beendet werden.

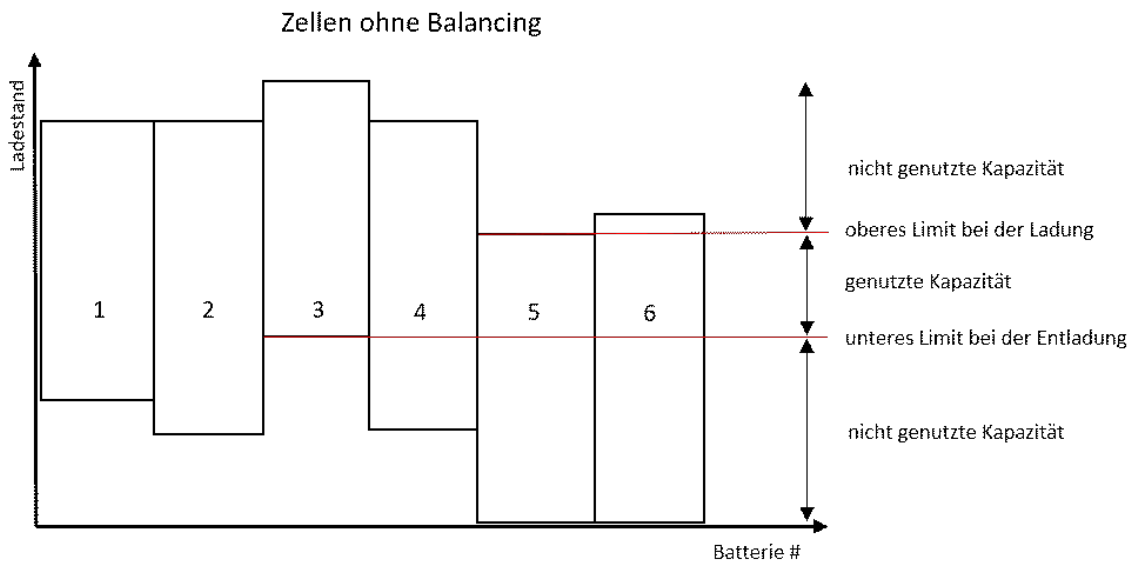


Abbildung 3-1: Limitierung der Kapazität durch fehlendes Balancing nach [39]

Wird ein Ladevorgang ohne Balancing in dieser Situation fortgesetzt, so werden die verbleibenden Zellen so lange geladen, bis die Zelle mit dem langsamsten Ladevorgang einen SOC von 100% erreicht. Bei der Verwendung von Blei-Säure Zellen führt diese starke Überladung zum Ausgasen des Wassers im Elektrolyten und somit zur Zerstörung der einzelnen Zellen. Im Falle von Lithium-Ionen Zellen kann es sogar zum Thermal Runaway und damit zu einem verheerenden, nur schwer oder bedingt löschbaren Zellbrand kommen. [16]

Wird der Ladevorgang beendet, wenn sich Zelle 5 bei 100% SOC befindet, so limitiert diese Zelle die für die Entladung zur Versorgung der Last bereitstehende Kapazität. Bei der Energieabgabe werden alle Zellen mit derselben Entladerate beansprucht. Dementsprechend wird Zelle 5 deutlich vor allen anderen Zellen im Verbund entladen sein. Greift zu diesem Zeitpunkt kein BMS in den Entladeprozess ein und stoppt den Vorgang, wird Zelle 5 solange tiefenentladen bis die Summe der Zellenspannungen die Entladeschlussrate erreicht hat.

Ohne das Eingreifen von BMS und Balancing werden irreparable Zellschäden in Kauf genommen. Es kann niemals die volle Kapazität eines Akkupacks genutzt werden. Darüber hinaus steigt die Wahrscheinlichkeit eines nicht im Voraus erkennbaren Versagens beträchtlich.

3.1.2 Laden mit Balancing

Zu Beginn des Ladevorgangs liegen wiederum sechs Zellen mit unterschiedlichem SOC vor. Beim Laden mit Balancing haben diese Zellen am Ende des Ladens allerdings alle die gleiche Zellspannung. In diesem Fall erzielen wir auch die richtige Summenspannung aus den sechs Zellen 12V, was verdeutlicht, dass erst durch den Einsatz des Balancings wirklich die volle Kapazität des Akkus vorliegt und genutzt werden kann. Prinzipiell wird beim Balancing

zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden. Es besteht jedoch kein Unterschied in der Qualität des Endergebnisses, sondern lediglich wie dieses erreicht wird. In beiden Fällen können wir also davon ausgehen, dass am Ende des Ladevorgangs ausgewogen über alle Zellen deren maximaler SOC erreicht wird. Die Wahl des Balancing-Systems richtet sich also nach anderen Faktoren wie Zelltyp, Preis und Einsatzbedingungen.

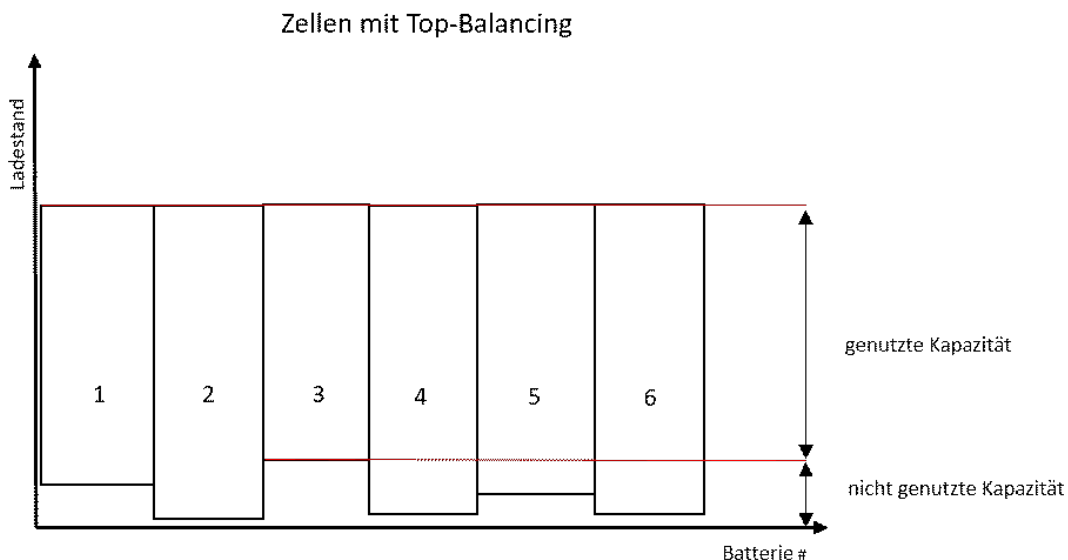


Abbildung 3-2: Durch Top-Balancing ausgeglichener Ladestand der Zellen nach [39]

3.1.3 Passives Balancing

Beim passiven Balancing handelt es sich um ein sogenanntes Dissipativsystem. Das bedeutet, dass während dem Ladevorgang die überschüssige Energie stärkerer Zellen über einen externen Verbraucher dissipiert wird. Dazu überprüft das System den SOC der einzelnen Zellen oder Batterien. Ergibt das Monitoring, dass eine Zelle bereits ihren vollen SOC erreicht hat, während dies für die anderen noch nicht der Fall ist, wird das Balancing für diese Zelle aktiviert. Der Ladevorgang wird fortgesetzt und die Überschussenergie der betroffenen Zelle wird durch den Balancer verbraucht, ohne dass dort überladen wird. Im Allgemeinen verfügt der Balancer über einen einfachen Heizwiderstand als dissipatives Element und wandelt damit die überschüssige elektrische Energie in Wärme um.

Im Vergleich zum aktiven Balancing kann die passive Variante sehr einfach, robust und vor allem kostengünstig realisiert werden. Es ist keine weitere Leistungselektronik notwendig, da es ausreicht, die SOC-Werte der Zellen miteinander zu vergleichen und lediglich bei Abweichungen von einem gesetzten Schwellwert korrigierend einzugreifen. Anzumerken ist, dass sich der Ladevorgang bei dieser Variante so lange verzögert, bis auch die schwächste Zelle im Verbund den gewünschten SOC vollständig erreicht hat. In dieser Zeit wird die Überschussenergie aller anderen Zellen in Wärme umgewandelt. Bei der Integration eines Balancing-Systems ist es sinnvoll, eine zusätzliche Temperaturüberwachung zu integrieren.

Damit können unter anderem die Temperaturen der Batterien, der Umgebung und eines eventuellen Batterieraums überwacht werden. [17] [18]

3.1.4 Aktives Balancing

Im Gegensatz zu passiven Balancing-Systemen handelt es sich beim aktiven Balancing um kein dissipatives System. Überschussenergie wird also nicht in Wärme umgewandelt und an die Umgebung abgegeben. Stattdessen zielen diese Systeme darauf ab, die Energie von stärker geladenen Zellen an schwächere im Verbund abzugeben. Solche Systeme sind in der Realisierung wesentlich aufwendiger und kostspieliger. Der zusätzliche Einsatz von Leistungselektronik und Laderegelung resultiert in höherer Komplexität und Anfälligkeit. Diese Komponenten bilden eine übergeordnete Ebene, die die Zellen miteinander verbindet. Der Laderegler vergleicht dabei die Zellenspannungen miteinander. Sobald der Ladestand einer Zelle den der übrigen Zellen um einen definierten Faktor übersteigt, wird die Überschussenergie dieser Zelle über diese übergeordnete Ebene an schwächere Zellen geleitet. Dazu können vom Laderegler Verbindungen zwischen den betroffenen Zellen freigeschaltet werden. Nach Ausgleich der Spannungsdifferenz oder Erreichen eines definierten SOC schließt die Elektronik diesen Kanal wieder und die Standardladung wird fortgesetzt. Der erhöhte Aufwand im Vergleich zur passiven Variante wird hier durch höhere Effizienz des Systems kompensiert, da die Ladungsenergie aktiv umgeleitet statt dissipiert wird. Dieses System findet daher vor allem in der Elektromobilität Anwendung, wo jede gewonnene Wattstunde ein deutliches Plus an Performance und Komfort mit sich bringt und so ein entscheidendes Kaufkriterium darstellt. Bei einem allgemeinen Ladewirkungsgrad von 80% bis 85% und SOC-Unterschieden von 5% und einem Energietransfer-Wirkungsgrad von z.B. 70% werden sich der Aufwand und die erhöhte Ausfallrate eines komplexen aktiven Balancing-Systems in den wenigsten Fällen amortisieren.

Generell wird deutlich, dass die Art des Balancing klar vom Einsatzzweck abhängig ist und nicht eine Universallösung existiert, die pauschal für alle Aufgabengebiete eingesetzt werden kann. Vielmehr handelt es sich bei diesen Systemen um maßgeschneiderte Lösungen, die schon in der Konzeptionsphase der geplanten Anwendung berücksichtigt werden müssen. Eine nachträgliche Integration oder Änderung des Balancing-Systems ist nur mit erheblichem Mehraufwand realisierbar oder gar nicht erst möglich. Zusätzlich wird nicht nur zwischen aktivem und passivem Balancing unterschieden, sondern auch, ob der Balancer im Lade- oder Entladevorgang eingesetzt wird.

3.1.4.1 Bottom-Balancing

Bottom Balancing agiert am unteren Ende des SOC, wenn die Zellen oder Batterien den Entladevorgang durchlaufen haben. Der Laderegler vergleicht die Zellen im Pack miteinander mit dem Ziel alle Zellen im Verbund auf denselben unteren Ladestand zu bringen. Zellen die zu diesem Zeitpunkt einen höheren SOC als die schwächste Zelle haben, werden über den Balancer so lange entladen bis sie auf ebendiesem Spannungsniveau liegen. Diese Variante des Balancing findet wenig Einsatz, da die Unterschiede im SOC generell über das BMS in Kombination mit Top Balancing kompensiert werden sollen, um ein Überladen von Zellen mit

den damit verbundenen Gefahren zu vermeiden. Darüber hinaus macht der Einsatz von Bottom Balancing nur Sinn, wenn die Zellen nahezu vollständig entladen sind. Ein nicht- oder nur halbentladenes Akkupack müsste erst zwangsentladen werden, um es balancieren zu können. Dieser Umstand macht das System für den Alltagsgebrauch wenig praktikabel.

3.1.4.2 Top-Balancing

Top-Balancing wird gegen Ende des Ladevorgangs, kurz bevor der Zellenpack seine maximale Kapazität erreicht, eingesetzt. Die Kapazität wird vom SOC der einzelnen Zellen im Akkumulator bestimmt. Die schwächste Zelle limitiert die anderen Zellen und kompromittiert damit den gesamten Pack. Mit Top-Balancing wird das Ziel verfolgt, die einzelnen Zellen auf ihren maximalen Ladestand zu bringen, um die vollständige Kapazität des Akkumulators auszuschöpfen. Ohne dieses Verfahren führt die schwächste Zelle über die Lebensdauer des Packs zur sukzessiven Degradation aller anderen Zellen, weil deren Aktivmaterial nicht umgesetzt wird und damit ebenso unbrauchbar wird. Um diesem Mechanismus vorzugreifen, setzt das Top Balancing erst ein, wenn der Akkupack fast vollständig geladen ist. Auf diese Weise trägt das System zum Überladungsschutz der einzelnen bei und erhöht gleichzeitig die nutzbare Gesamtkapazität über die Lebensdauer des Akkupacks. Die Ladespannung nimmt mit dem SOC zu, sodass zum Ende hin auch eine höhere Energiedichte gegeben ist.

3.1.4.3 Kontinuierliches Balancing

Beim kontinuierlichem Balancing findet der Balancingprozess parallel zum Ladevorgang statt. Die Idee dahinter ist die Realisierung einer kürzeren Ladedauer, weil der Ladezustandsausgleich im Vergleich zu Bottom- oder Top-Balancing nicht erst erfolgt, wenn entweder die obere oder untere Lade- bzw. Entladespannung erreicht sind. Ein entscheidender Nachteil dieser Variante ist, dass der anliegende Ladestrom die Ladespannungen beeinflusst und verfälschen kann. Die tatsächlichen Spannungen können also von den gemessenen Werten abweichen und somit die Effektivität des Balancings senken. Zusätzlich zeigt sich, dass sich bei einigermaßen gleichen Zellen erst gegen Erreichen der Zellen-Ladeschlussspannung für das Balancing auswertbare Unterschiede in der Zellenspannung ergeben und das kontinuierliche Balancing schlussendlich dem Top-Balancing entspricht.

Allen Balancing-Einrichtungen ist bei kostenbewusster Auslegung gemeinsam, dass die Balancing-Ströme (Bereich 0,1% bis 1% des Nennstroms) deutlich unterhalb der Ladeströme (Bereich 10% bis 100% des Nennstroms) liegen.

4 Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Die unterbrechungsfreie Stromversorgung ist ein essenzieller Bestandteil in der Energieversorgung kritischer Infrastruktur. Eine USV stellt innerhalb kürzester Zeit Strom zur Verfügung, wenn das Versorgungsnetz zum Beispiel aufgrund eines Netzdefekts oder fehlender Produktion bzw. Einspeisung keine Energie mehr liefert. Zusätzlich schützt eine USV die versorgte Infrastruktur vor schlechten Netzeinflüssen wie Ober- und Unterspannung oder vor den Einflüssen schädlicher Oberschwingungen. Letztere treten vermehrt bei der fluktuierenden Stromeinspeisung aus Erneuerbaren, wie Windkraft oder Photovoltaik, auf. [13]

Die IT-Infrastruktur stellt in der heutigen, digitalisierten Welt ein essenzielles und ebenso kostspieliges Element dar und kein Unternehmen oder öffentliche Stelle kann es sich leisten, diese zu vernachlässigen. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger, diese Komponenten so gut wie möglich zu schützen und den kontinuierlichen und problemlosen Betrieb zu sichern, da jeder Ausfall mit enormen Kosten verbunden ist.

Im Regalärbetrieb, bei funktionierendem Netz, überwacht die USV die Stromversorgung und speichert Energie in die zugehörigen Akkumulatoren, über die im Bedarfsfall ein Überbrückungsbetrieb gespeist werden kann oder ein Ausgleich bei schwankenden Netzbedingungen stattfindet. Dementsprechend ist es wichtig, die Kapazität dieser Backup-Akkus ausreichend zu dimensionieren, um für den Bedarfsfall notwendige Reserven zu generieren. Hier gibt es USVs, die eine Versorgung für kurze Perioden sicherstellen, gerade so lange, bis ein integriertes Backupsystem oder Aggregat hochfahren kann, um die Versorgung zu übernehmen. Komplexere und damit auch kostspieligere Varianten verfügen über größere Energiespeicher, sodass auch längere Ausfallszeiten aus dem Energiespeicher der USV überbrückt werden können. Handelsübliche Systeme letzterer Variante sind für unsere Anwendung am OMV Bohrplatz noch immer zu gering dimensioniert, sodass sich ein Backup von nur wenigen Minuten ergeben würde. [40]

Darüber hinaus sind diese Systeme in ihrer Auslegung nicht robust genug, um den Gegebenheiten am Förderplatz Bockfließ ohne Weiteres zu widerstehen. Der Aufbau der Messeinrichtung ist in einem Seecontainer im Nahbereich der Bohrung untergebracht. Diesen Container habe ich zusammen mit anderen Studenten am Institut für Elektrotechnik der Montanuniversität Leoben ausgelegt und aufgebaut. Prinzipiell ist der Frachtcontainer mit einer aktiven Belüftung versehen, dennoch kann er sich an heißen Sommertagen durch direkte Sonneneinstrahlung auf Temperaturen von über 60°C aufheizen. Genauso ist die Anlage im Winter widrigen Bedingungen und tiefen Temperaturen am offenen Feld in Bockfließ ausgesetzt. Die Einbringung von feinstem Staub aus der Umgebung kann die vorhandene Elektronik zusätzlich beeinträchtigen. Ein reibungsloser Betrieb ohne regelmäßige Wartung und Kontrolle ist mit Standardequipment daher nicht realisierbar.

Infolgedessen war es notwendig, für diesen Einsatz ein maßgeschneidertes System aufzubauen, das darauf ausgelegt ist, unter den an der Bohranlage herrschenden Umwelteinflüssen zu bestehen.

4.1.1 EATON EX 3000 RT

Die Basis für die optimierte USV in meinem Aufbau bildet eine EATON EX 3000 RT aus der Pulsar Serie. Bei der EX 3000 RT handelt es sich um eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, die auf eine Ausgangsspannung von 230V AC ausgelegt ist und über eine Ausgangsleistung von 3000 VA respektive 2700 W verfügt. Durch eine integrierte Frequenzwandlerfunktion ist diese USV sowohl in 50Hz- als auch in 60Hz- Netzen einsetzbar. Serienmäßig wird die EX 3000 RT mit einem integrierten Batteriepack geliefert. Dieses besteht aus sechs 12V-Bleiakkumulatoren mit einer Kapazität von je 9 Amperestunden (Ah).

Eingesetzt wird die EATON EX 3000 RT, um die Strommessung und das Messequipment an der OMV-Förderanlage in Bockfließ vor negativen Netzeinflüssen zu schützen und die Anlage bei Ausfall der örtlichen Stromversorgung lange genug zu speisen, bis diese wiederhergestellt werden kann oder andernfalls einen sicheren Shutdown ohne Datenverlust sicherzustellen. Dies kann durch die intern verbauten Bleibatterien für diesen Anwendungsfall allerdings nicht ohne weiteres gewährleistet werden. Aus diesem Grund habe ich die USV um die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Oerlikon Bleiakkumulatoren erweitert. Ein Batteriearray bestehend aus zwei mal sechs Oerlikon 12CP50 Akkumulatoren bringt eine Zusatzkapazität von 100Ah für unsere Anwendung. Diese zwei Arrays in Kombination mit dem internen Batteriespeicher der EATON EX 3000 RT stellen im finalen Aufbau eine Gesamtnennenergie von 7848 Wh bereit



Abbildung 4-1: Produktbild der EATON EX 3000 aus [40]



Abbildung 4-2: In der Markierung die integrierten Akkus mit einer Gesamtkapazität von 9 Ah

Weitere Details zur unterbrechungsfreien Stromversorgung EATON EX 3000 RT sind dem Datenblatt im Anhang zu entnehmen.



Abbildung 4-3: Sicht in den Seecontainer am Förderplatz Bockfließ

5 Hardware

Für die hardwaretechnische Realisierung habe ich die Systemkomponenten in funktionelle Gruppen gegliedert und die Platinen dementsprechend aufgebaut. Prinzipiell lässt sich die Schaltung in mehrere Komponenten teilen. Das Blockschaltbild unten dient zur Übersicht und vereinfacht die Erklärung.

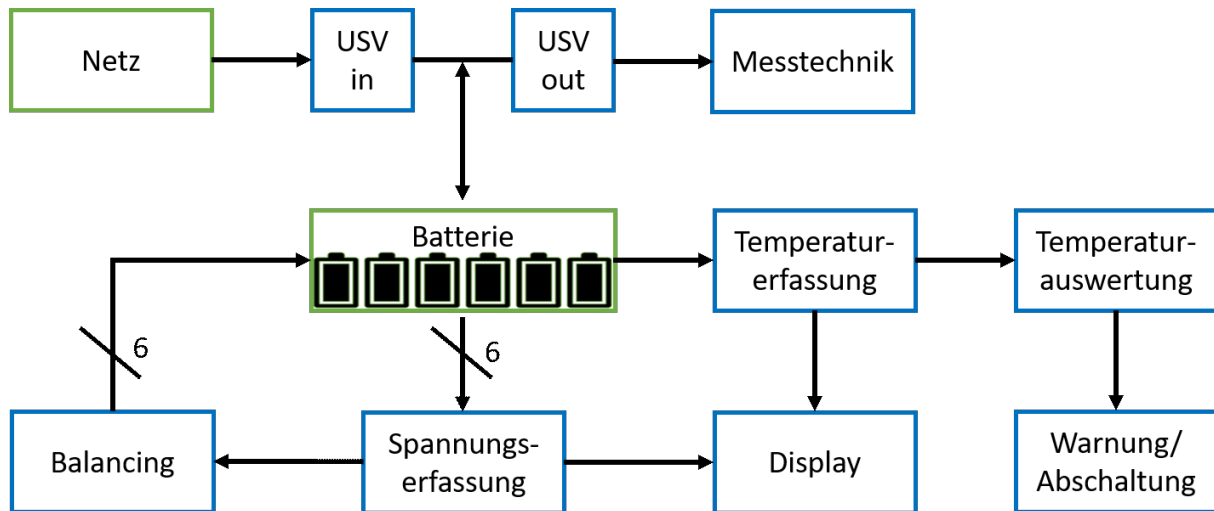


Abbildung 5-1: Blockschaltbild zur vereinfachten Darstellung der funktionellen Gruppen

Die unterbrechungsfreie Stromversorgung ist zwischen dem Versorgungsnetz und der Messtechnik im OMV-Container geschaltet. Hier können wir zwischen USV-in und USV-out unterscheiden. Bei gegebener und vor allem sauberer Stromversorgung ohne Störeinflüsse kann die USV die Messtechnik direkt mit dem Strom aus dem Netz versorgen. Zusätzlich kann die USV bei Bedarf den Strom aus dem Netz nutzen, um das Akkupaket zu laden. Diese Akkus werden in weiterer Folge von meiner Schaltung hinsichtlich Temperatur und Spannung überwacht.

Zuerst nimmt die Spannungserfassung die Einzelspannungen der verbauten Akkumulatoren auf. Diese Spannungswerte werden addiert und der Mittelwert aus der errechneten Summe gebildet. Im nächsten Schritt werden die Einzelspannungen der Akkumulatoren gegen diesen Mittelwert referenziert. Bewegt sich eine der Spannungen außerhalb einer definierten Toleranz über diesem Mittelwert, muss das Balancing-System eingreifen, um die Ladespannung des betroffenen Akkus auf den Mittelwert einzustellen. So wird verhindert, dass ein Akku mit höherer Ladespannung, also bereits höherem SOC, überladen wird, während sich die anderen Akkumulatoren im Verbund noch im Ladeprozess befinden. Jeder Akku wird vom Ladestand her so lange ausbalanciert, bis der letzte Akku vollgeladen ist. Erst dann schaltet das System ab. Auf diese Weise sorgt meine Schaltung dafür, dass die USV immer mit der maximal verfügbaren Akkukapazität arbeiten kann und somit die Funktion der Messtechnik auch bei langen Perioden ohne Netzversorgung aufrecht erhalten bleibt und keine Daten verloren gehen. Hier ist ein kontinuierliches Balancing realisiert, um zu jedem Zeitpunkt optimal eingreifen zu können, wenn dies durch Ungleichheiten, wenn dies durch Ungleichheiten in der Spannung erforderlich wird.

Die zweite funktionelle Einheit überwacht parallel zur ersten die Temperaturen der einzelnen Akkumulatoren. Hier wird über einen kalibrierten Temperatursensor die Oberflächentemperatur von jedem Batteriegehäuse gemessen. Ähnlich wie bei der Spannungserfassung wird ein Mittelwert aus den gegebenen Temperaturen gebildet. Dieser Mittelwert wird dann mit der Umgebungstemperatur vor Ort verglichen. Übersteigt der Mittelwert aus den Akkutemperaturen die Umgebungstemperatur um einen ersten Schwellwert, kann das System in erster Konsequenz eine Warnmeldung ausgeben, um auf das Erreichen einer für die Komponenten kritischen Temperatur hinzuweisen. Wenn auf dieses Signal keine Reaktion folgt und die Temperatur weiter steigt, leitet diese Einheit eine Abschaltung des Gesamtsystems ein. Diese Kontrolleinrichtung gewährleistet die operative Sicherheit des Systems im Stand-Alone-Betrieb. Mit dem aufgebauten System können Fördereinrichtungen in exponierter Lage wie in Bockfließ über viele Wochen hinweg ohne physische Anwesenheit und Kontrolle durch Externe überwacht werden. Darüber hinaus werden die verwendeten Akkumulatoren zur off-grid-Energieversorgung optimal genutzt und ihre Lebensdauer verbessert. Das Temperaturmonitoring stellt eine weitere Sicherheitsebene für kritische Infrastruktur, wie hier gegeben, dar.

Auf den genauen Aufbau der Gruppen und die zugrundeliegende Logik gehe ich in den folgenden Punkten im Detail ein.

Zu Beginn werden die Eingangsspannungen aus den sechs Oerlikon Akkus über eine Reihe von Eingangswiderständen geleitet. Diese Komponente dient als Schutzeinrichtung für die Balancing-Schaltung. Im Fehlerfall fließen so über die Hochvoltseite der Akkumulatoren zur Schutzkleinspannung der Regelelektronik nur minimale Ströme weit unter 1mA, sodass im Falle einer Überspannung oder eines Kurzschlusses in der Elektronik keine Beschädigung an der Schaltung zu befürchten ist. Die darauffolgende Komponente stellt die eigentliche Recheneinheit dar. Auf der Recheneinheit werden im ersten Schritt die sechs Eingangsspannungen aufaddiert und in weiterer Folge der Mittelwert aus der Summe der Eingangsspannungen gebildet. Durch den Vergleich dieses Mittelwerts mit einem definierten Referenzwert wird errechnet, ob ein Eingreifen der Balancer notwendig ist. Der Balancer an sich ist für jeden Akku eigenständig ausgeführt. Es gibt also pro Akku-Rack sechs einzelne Balancing-Boards, von denen jedes mit einem Akku aus der USV verbunden ist. In den folgenden Punkten werde ich detaillierter auf den Aufbau des Gesamtsystems und die Funktion der einzelnen Bestandteile eingehen.

Die gesamte Schaltung basiert auf einer Kombination von Operationsverstärkerschaltungen. Durch den Einsatz der Operationsverstärker ergibt sich ein analoges Design, das den vollen Funktionsumfang der Aufgabenstellung erfüllt und dabei noch sehr robust und unempfindlich gegen Programmversagen ist. Des Weiteren ist dieses analoge System sehr schnell in der Verarbeitung der zugeführten Daten. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Adaptierung auf geänderte Umgebungsbedingungen wie zum Beispiel den Wechsel von Blei-Säure Batterien auf Lithium-Ionen-Technik nicht ohne weiteres zu bewerkstelligen ist. Der Grund dafür liegt in der präzisen Abstimmung und Ausrichtung des Systems auf die zugrundeliegende Batterietechnik. Im Gegensatz zu einer Lithium-Ionen-Versorgung ist meine Schaltung darauf

ausgelegt, mit der für Blei-Säure Batterien üblichen Zellspannung im Bereich von 2V zu arbeiten.

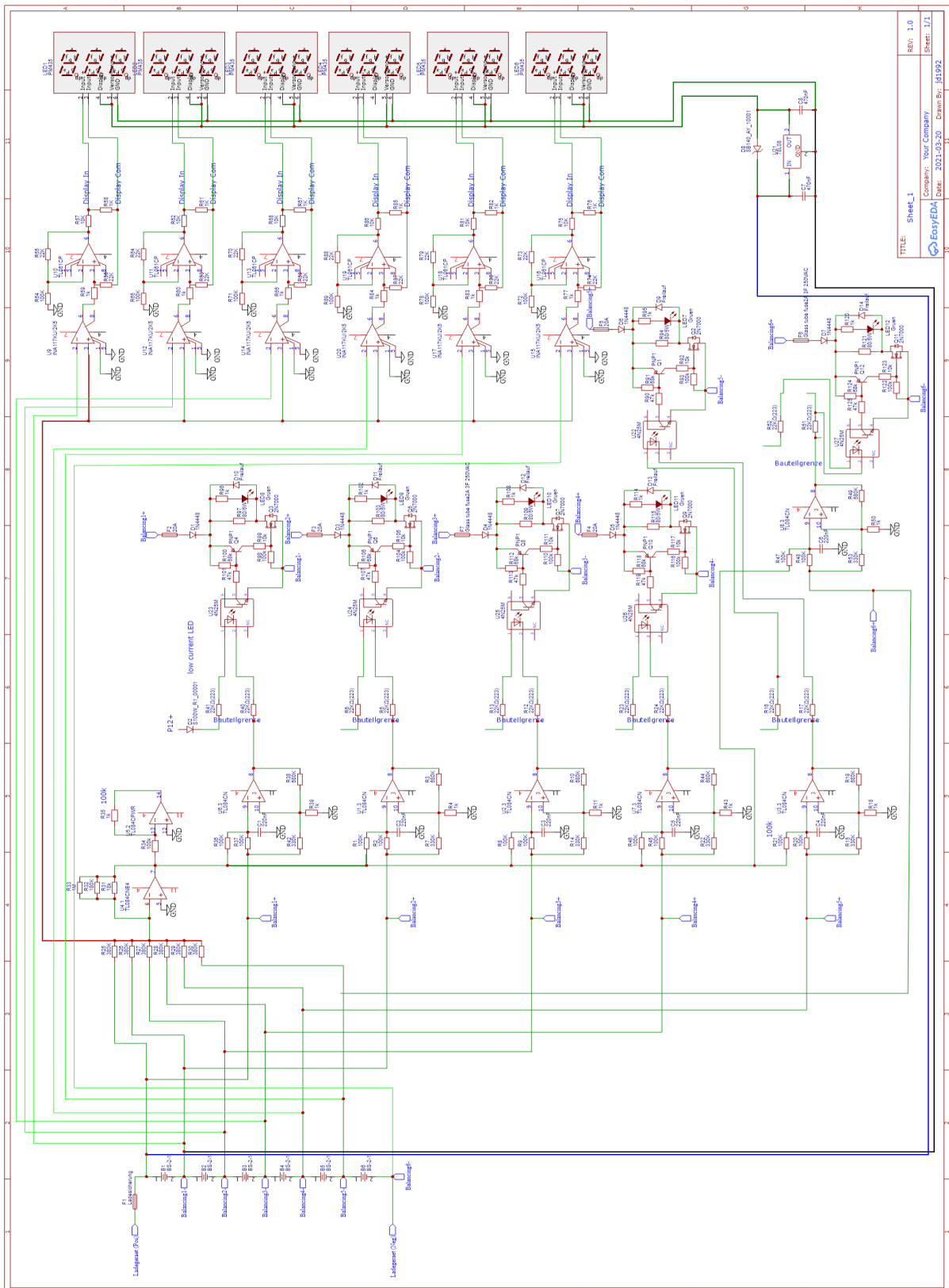


Abbildung 5-2: Gesamtschaltbild in EasyEDA gezeichnet

Das Gesamtschaltbild verdeutlicht, dass die vollständig analoge Schaltung auf einer Kombination von unterschiedlichen OPV-Schaltungen aufbaut. Die Datenblätter der eingesetzten Operationsverstärker sind im Anhang ersichtlich. Prinzipiell ist zu sagen, dass ich bei der Auswahl der verwendeten Operationsverstärker besonderes Augenmerk auf die Energieeffizienz und die Robustheit im definierten Einsatzgebiet gelegt habe.

5.1 Funktionsprinzip

Zur Erklärung der einzelnen OPV-Schaltungen und deren Funktion werde ich in den folgenden Punkten den Weg des Messsignals Schritt für Schritt verfolgen. Bei Operationsverstärkern handelt es sich um elektronische Bauteile, die je nach äußerer Beschaltung unterschiedliche Funktionen ausführen können. Verstärkt werden sowohl Gleichspannungen als auch Wechselspannungen. In seiner einfachsten Bauform verfügt ein Operationsverstärker, wie am folgenden Bild dargestellt, über zwei Eingänge und einen Ausgang. [24]

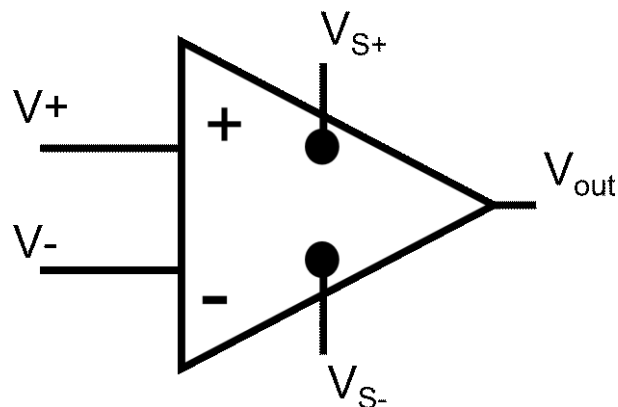


Abbildung 5-3: Abbildung des unbeschalteten OPVs

Bei den Eingängen wird zwischen invertierendem und nicht-invertierendem Eingang unterschieden. Je nach Wahl des Eingangs wird das zu verarbeitende Signal dementsprechend gleich wie das Eingangssignal oder invertiert, also negativ verstärkt, ausgegeben. Am Ausgang erhalten wir die verstärkte Differenz aus den beiden Eingangsspannungen. Versorgt wird der Operationsverstärker über die zwei Anschlüsse, hier mit V_{S+} und V_{S-} gekennzeichnet. Die Werte für die richtige Versorgung kann den Datenblättern der eingesetzten OPVs entnommen werden. Üblicherweise bewegen sich diese bei $\pm 5V$, $\pm 12V$ oder $\pm 15V$. [24]

Der ideale Operationsverstärker hätte eine unendliche Verstärkung, einen unendlich großen Eingangswiderstand, einen Ausgangswiderstand von Null und würde einen Frequenzbereich von Null bis unendlich abdecken. In der Praxis ist das nicht realisierbar. Wir müssen Verzerrungen und Rauschen bei der Signalverarbeitung berücksichtigen und uns im Rahmen der technischen Möglichkeiten der Analogtechnik bewegen. Da wir in der Planung von

elektronischen Netzwerken von einem idealen Operationsverstärker ausgehen, gilt es die Rahmenbedingungen durch den Aufbau rund um den Operationsverstärker so ideal wie möglich zu gestalten, um Störeinflüsse zu reduzieren und den OPV so in einem annähernd idealen Betriebsbereich einzusetzen. [24]

Kenngroße	Idealer OPV	Realer OPV
Verstärkung	Unendlich	ca 1.000.000
Eingangswiderstand	Unendlich Ω	1M Ω bis 1000M Ω
Untere Grenzfrequenz	0 Hz	0 Hz
Bandbreite	Unendlich Hz	>100 MHz, typ. 5 MHz
Gleichtaktverstärkung	0	ca. 0,2
Gleichtaktunterdrückung	Unendlich	74 dB
Rauschgangspannung	0 V	ca.3 μ V

Tabelle 4: Vergleich idealer / realer OPV

Ein Eingangssignal läuft auf einen invertierenden Eingang, das zweite auf einen nichtinvertierenden Eingang. Entsprechend der externen Beschaltung werden diese zwei Eingangssignale vom OPV verarbeitet und anschließend ein resultierendes Ausgangssignal ausgegeben. Die Versorgungsspannung von den in meinem Projekt eingesetzten Operationsverstärkern liegt bei +/- 15 Volt und darf nicht überschritten werden, um die korrekte Funktion zu gewährleisten und Defekte am Bauteil zu verhindern. Die minimale Versorgungsspannung für korrekte Funktion liegt bei etwa ± 3 Volt.

In der Praxis haben sich eine Reihe von sogenannten OPV-Grundsaltungen etabliert, die sich aus den unterschiedlichen Beschaltungen der Operationsverstärker ergeben und standardmäßig eingesetzt werden. Für mein Projekt relevante Grundsaltungen sind hier kurz erläutert.

Spannungsfolger - Impedanzwandler

Der Spannungsfolger stellt die einfachste Form oder besser gesagt Funktion eines Operationsverstärkers dar. Das Eingangssignal U_e gelangt über den nichtinvertierenden Eingang zum OPV und wird als U_A ausgegeben. Der Ausgang ist mit dem nichtinvertierenden Eingang des OPV rückgekoppelt. Da es in diesem Fall keine Beschaltung des OPVs durch externe Impedanzen gibt, beträgt die Verstärkung 1. Die Ausgangsspannung U_A folgt also der Eingangsspannung U_e , woraus sich der Name dieser Variante ableitet. Eingesetzt wird diese Version, um die Impedanz einer hochohmigen Quelle vor dem Operationsverstärker an einen nachgeschalteten niederohmigen Verbraucher anzupassen.

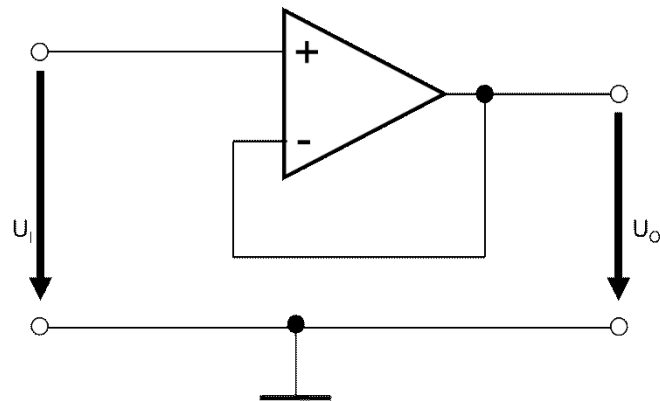


Abbildung 5-4: Schaltbild eines Spannungsfolgers nach [24]

$$U_o = U_I \quad (12)$$

Invertierender Verstärker

Die nachfolgende Abbildung zeigt den OPV als invertierenden Verstärker. Das Eingangssignal wird vorzeichenumgekehrt und um den Faktor V verstärkt ausgegeben. Die Verstärkung V ergibt sich aus dem Verhältnis von Eingangswiderstand R1 zu dem Widerstand R2 in der Gegenkopplung.

$$U_o = -U_I * \frac{R_2}{R_1} \quad (13)$$

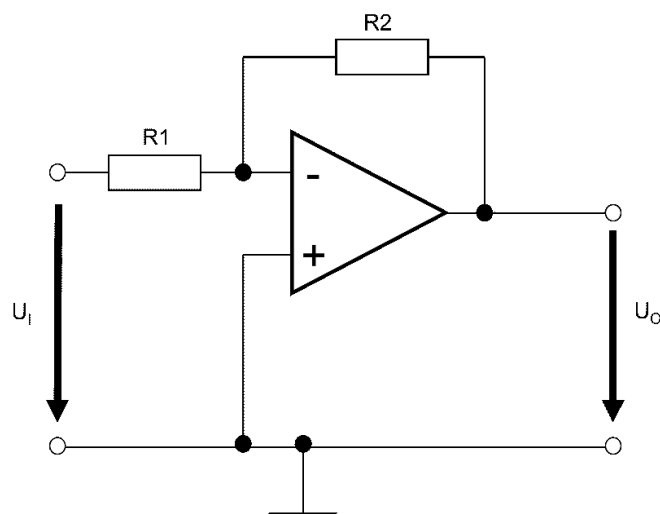


Abbildung 5-5: OPV als invertierender Verstärker nach [24]

Nicht-invertierender Verstärker

Der nicht-invertierende Verstärker gibt ein verstärktes Ausgangssignal aus. Wie am Namen ersichtlich ist die verstärkte Ausgangsspannung in diesem Fall nicht invertiert, sondern gleichpolig zur Eingangsspannung. Die Verstärkung geschieht im Gegensatz zum invertierenden Verstärker nicht im direkten Verhältnis von R_2 zu R_1 , sondern folgt der angeführten Formel und sieht folgendermaßen aus:

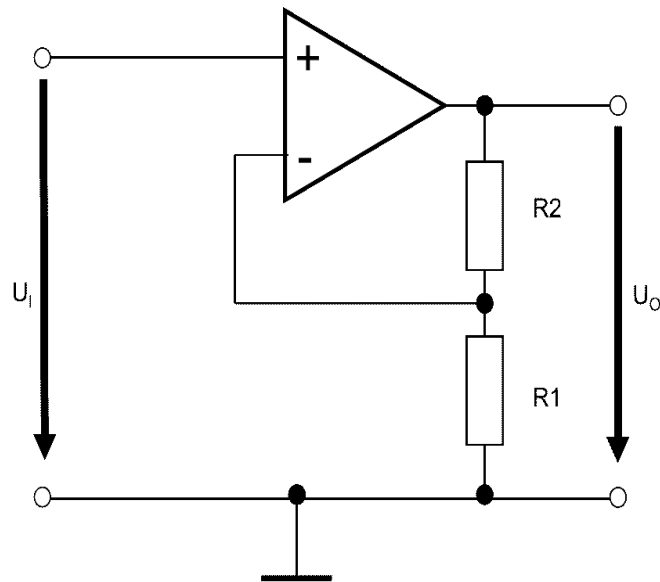


Abbildung 5-6: Aufbau als nicht-invertierender Verstärker nach [24]

$$U_o = U_i * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (14)$$

Differenzverstärker

Der Differenzverstärker, oder Subtrahierer, gibt die verstärkte Differenz der beiden Eingangsspannungen aus und kann so zum Beispiel eingesetzt werden, um die beiden Signale gegeneinander abzugleichen. Die Beschaltung ist unten dargestellt, wobei sich die Verstärkung in diesem Fall folgendermaßen verhält: $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$

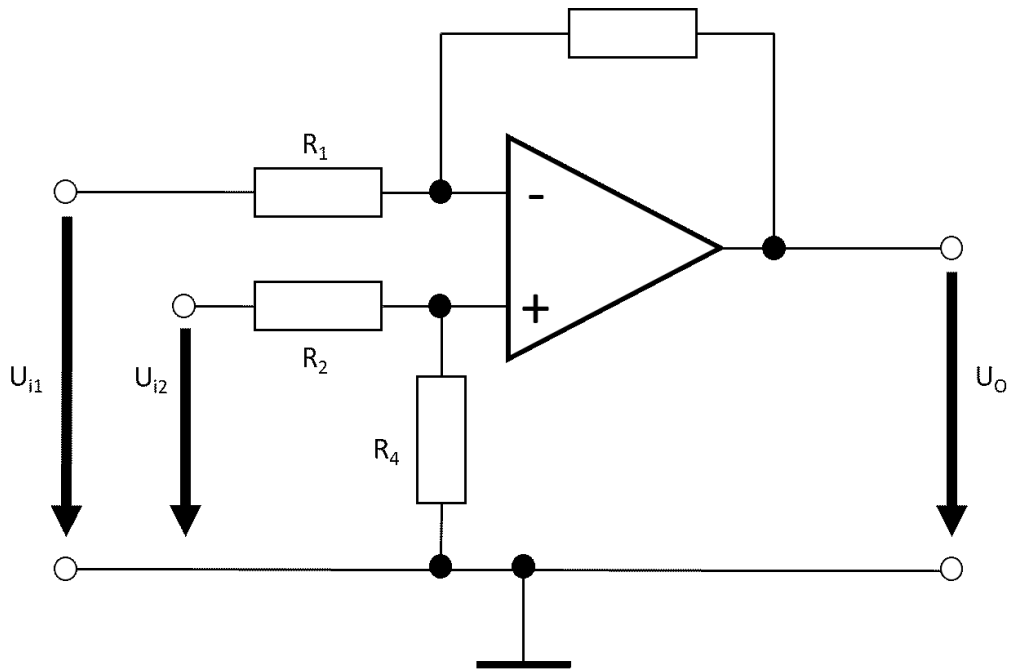


Abbildung 5-7: Beschaltung des Differenzverstärkers nach [24]

$$U_o = (U_{i2} - U_{i1}) * \frac{R_3}{R_1} \quad (15)$$

Schmitt-Trigger

Der Schmitt-Trigger ist eine Abwandlung eines Komparators mit nichtlinearer Beschaltung des Operationsverstärkers. Das Ziel ist eine Schwellwert- oder Kippschaltung. Der OPV arbeitet demzufolge nicht kontinuierlich, sondern schaltet eine Ausgangsspannung nur bei bestimmten Eingangsspannungen. Die Spannungsschwellen, für die Ausgangsspannungen geschaltet werden soll, können über die äußeren Widerstände R_1 und R_2 exakt eingestellt werden. Ebenso kann der Schmitt-Trigger invertierend und nicht-invertierend ausgeführt werden. Das hier angeführte Beispiel zeigt einen Schmitt-Trigger mit den dazugehörigen Spannungsverläufen von Eingangs- und Ausgangssignal.

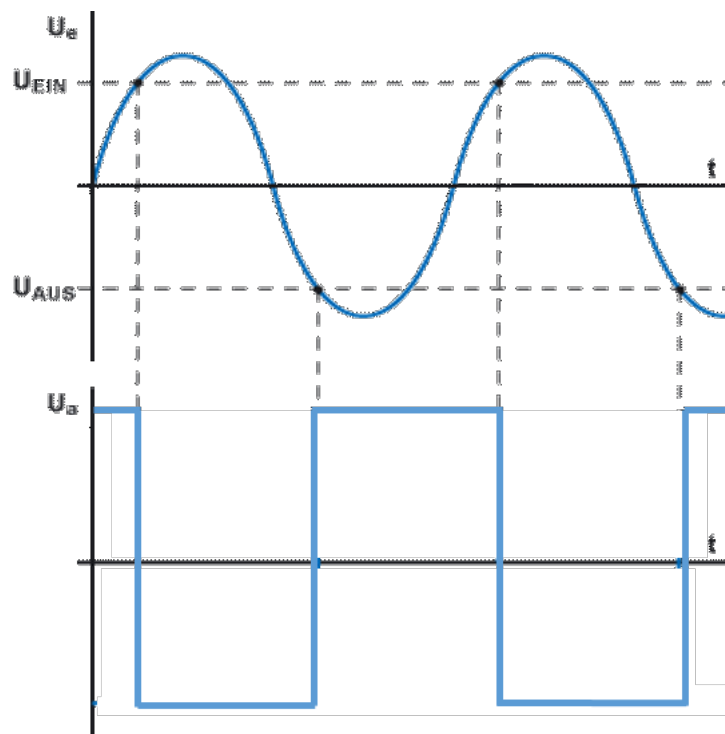


Abbildung 5-8: Spannungsverlauf und Schmitt-Trigger-Reaktion (invertiert) nach [24]

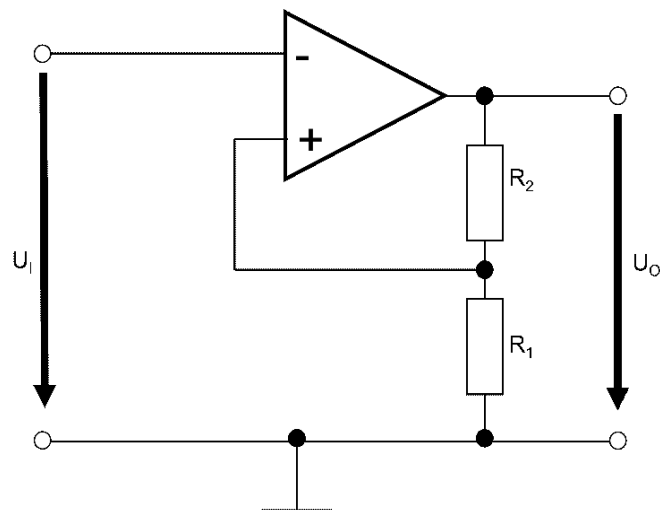


Abbildung 5-9: Aufbau einer invertierenden Schmitt-Trigger-Schwellwertschaltung nach [24]

5.1.1 Spannungserfassung

Im ersten Zug müssen die individuellen Batteriespannungen der einzelnen Batterien im Paket erfasst werden, um sich ein Abbild über deren Ladezustand machen zu können und diesen letztendlich gegeneinander abzugleichen. Nur wenn sich am Ende des Ladevorgangs alle

SOCs auf einem Level bewegen, wird die volle Kapazität des Batteriepacks für die Feldanwendung genutzt.

Der direkte Kontakt zu den Oerlikon Batterien wird über die Balancing-Platinen hergestellt, indem diese mit den Anschlussklemmen an der Oberseite jeder Batterie verschraubt werden.



Abbildung 5-10: Verbindung einer Balancing-Platine mit einem Oerlikon Akkumulator

Über die Vorwiderstände der Balancing-Platine, hier auf der folgenden Abbildung auf der rechten Seite im Detail hervorgehoben, wird die Batteriespannung auf die Rechner-Platine übertragen. Dort erfolgt die Verarbeitung des Signals über die OPV-Schaltungen. Die Recheneinheit arbeitet auf einem Spannungslevel von 4 Volt, weshalb die Batteriespannung von 12V über die hier markierten Widerstände zuerst auf 4V reduziert wird, ehe sie zur weiteren Verarbeitung auf die Rechnerplatine übertragen werden kann.

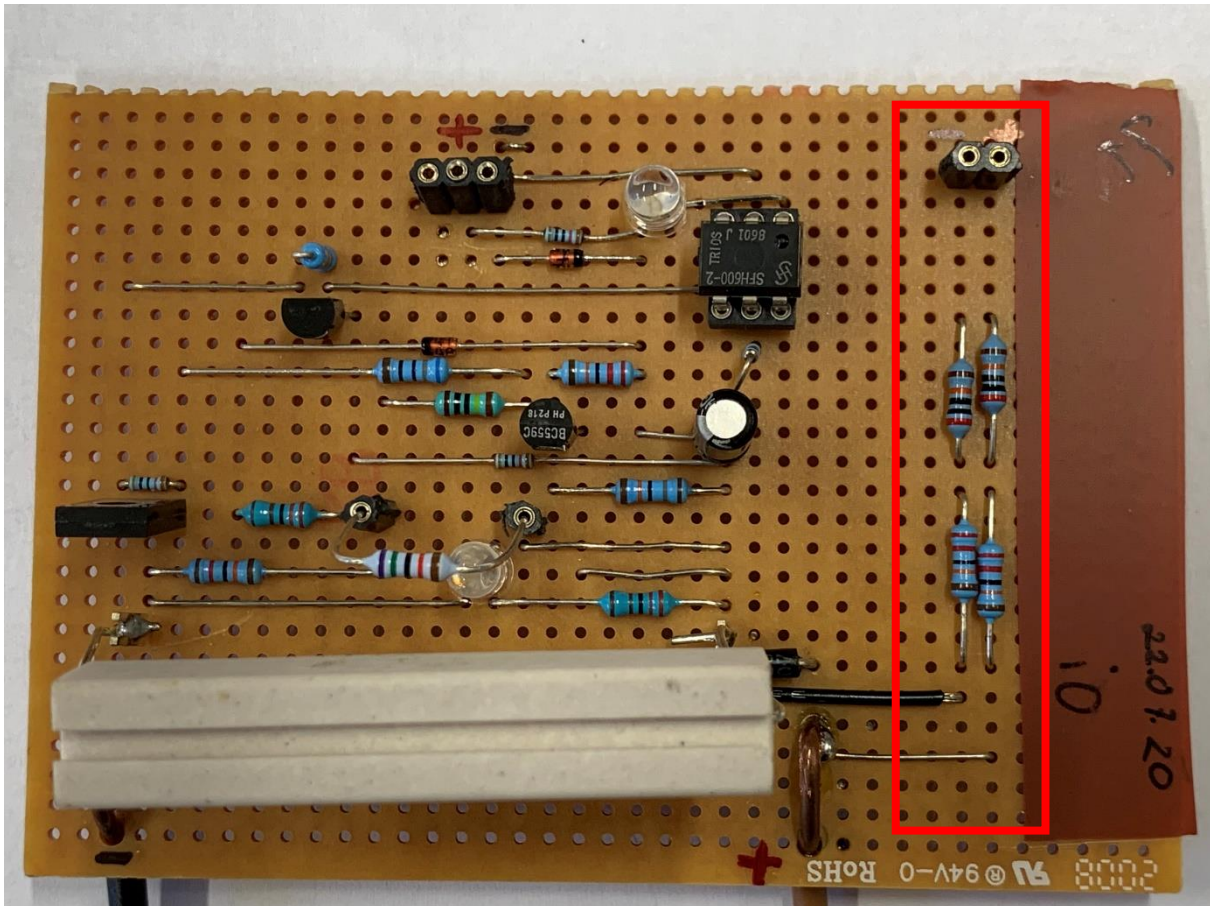


Abbildung 5-11: Vorwiderstände zum Anpassen des Spannungsniveaus für die verwendeten OPVs

Die Reihenschaltung als Schutzeinrichtung besteht aus einer Reihenschaltung von Widerständen mit einer Gesamtimpedanz von 659 k Ω (220k + 200K + 200k + 39k). Dadurch wird eine Verstärkung von 1/3, also ein Spannungsabbau von 12V auf 4V, erreicht. Der Aufbau aus den Widerständen 220k Ω + 200k Ω + 200k Ω + 39k Ω sorgt für ein sicher begrenztes Eingangssignal. Der letzte Widerstand vor dem Eingang in den OPV ist in Relation klein dimensioniert, weist eine niedrigere Toleranz auf und gleicht dadurch die Streuungen in den Widerständen aus. Eine präzisere Signalqualität ist das Ergebnis.

Auf den übrigen Teil der Balancing-Platinen werde ich weiter unten im Detail eingehen.

5.1.2 Spannungsauswertung und Ausgabe

Nach dem Herabsetzen der Eingangsspannung wird das Signal von der Rechenplatine verarbeitet. Auf der Platine sind drei OPVs der Type TL064 zu erkennen. Beim TL064 handelt es sich um einen Operationsverstärker mit vier internen Kreisen zur Signalverarbeitung. Die entsprechenden Datenblätter zum TL064 sind im Anhang beigefügt.

Der Input erfolgt hier, wie auf Abbildung 5-11 hervorgehoben, auf der rechten Seite der verbauten Steckerleisten. Aus dem eingehenden Signal werden die jeweiligen Batteriespannungen errechnet und an die Displayeinheit übermittelt.

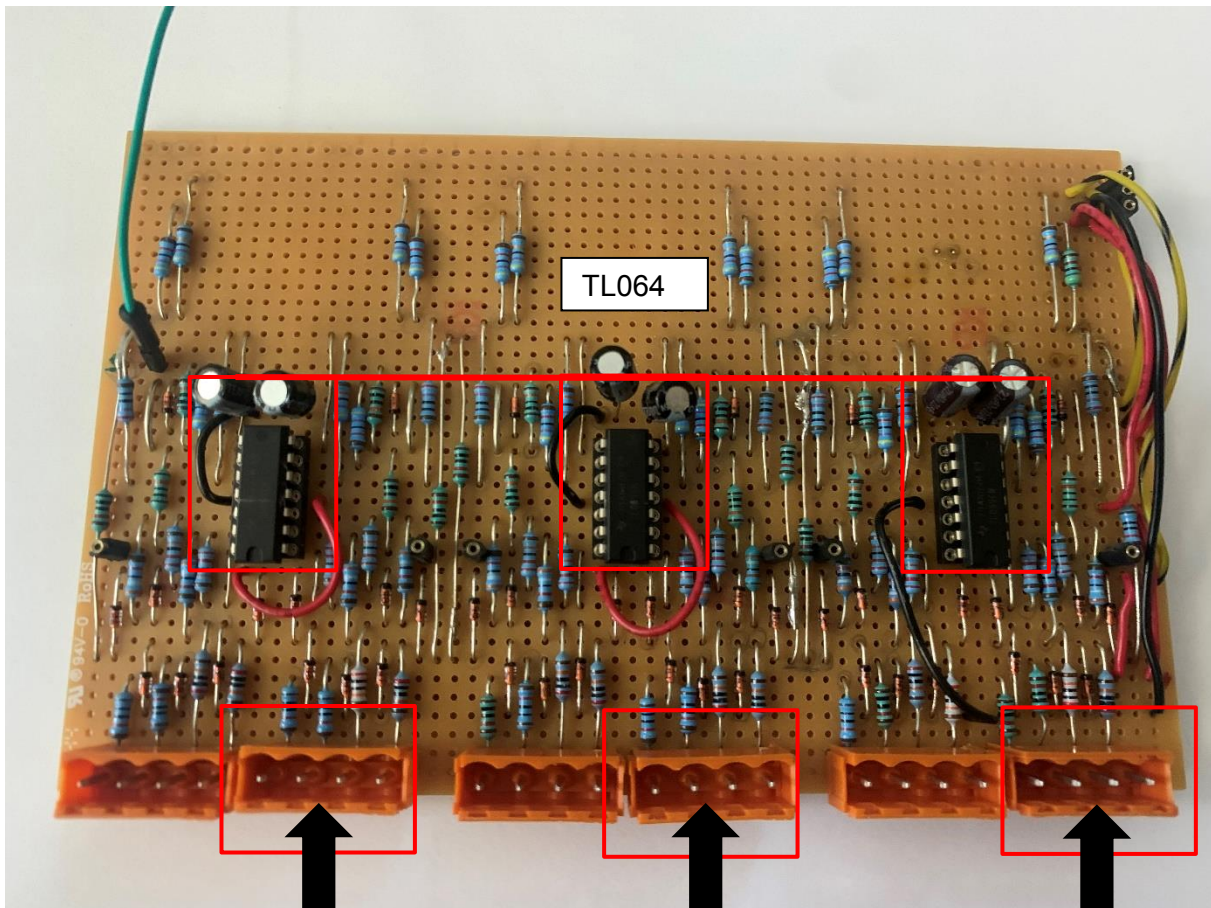


Abbildung 5-12: Eingang der Batteriespannungen auf der Rechnerplatine

Die Rechenplatine führt diese Operation für alle sechs Batterien synchron aus. Mit dieser Aufgabe sind die verbauten OPVs allerdings nur zur Hälfte ausgelastet. Im Sinne der Effizienz wird auf dieser Platine zusätzlich der Hauptteil der Berechnung für das Balancing erledigt. Darauf gehe ich in den folgenden Punkten genauer ein.

5.1.3 Mittelwertbilder

Nachdem die einzelnen Batteriespannungen über die Schutzschaltung gelaufen sind, kommen sie zum Mittelwertbilder. Es handelt sich dabei um eine Abwandlung einer weiteren OPV-Grundschaltung, dem Addierer, der wiederum auf dem invertierenden Verstärker basiert.

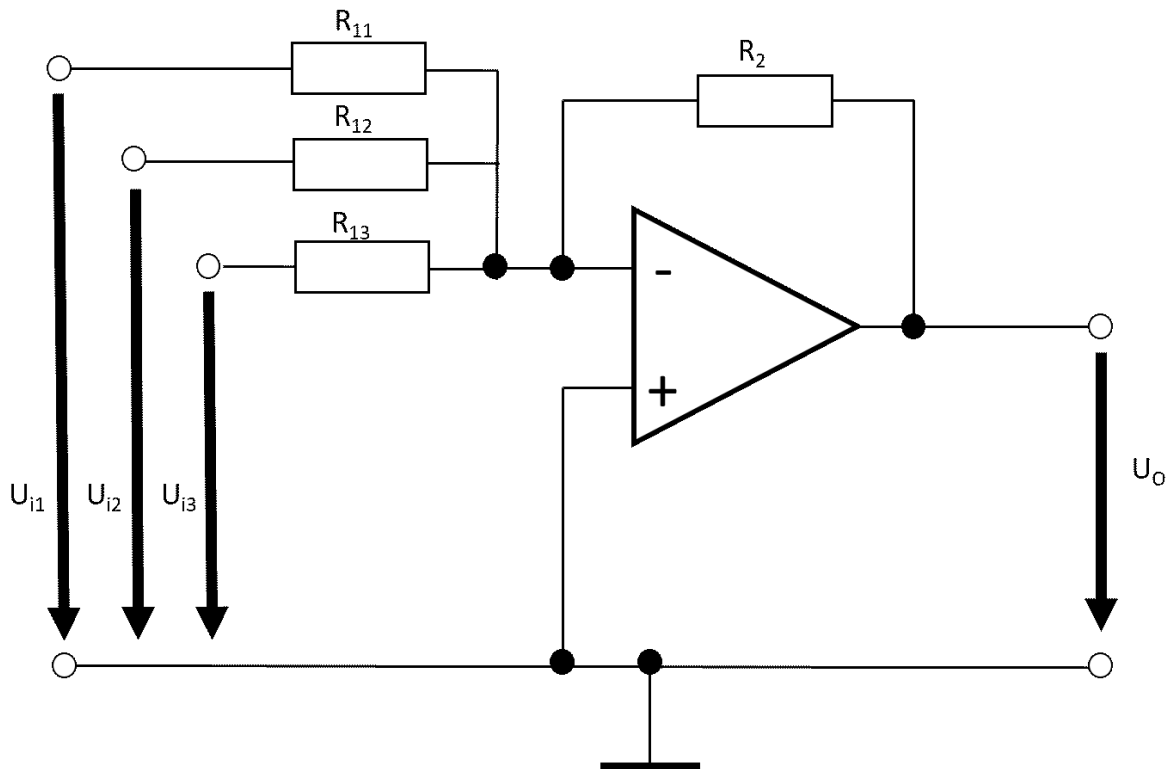


Abbildung 5-13: Schema des Addierers bzw. Summierverstärkers

Der Addierer, auch als Summierverstärker bezeichnet, bildet die Summe aus den eingehenden Einzelspannungen. Diese laufen vor dem invertierenden Eingang in einem virtuellen Nullpunkt zusammen und gehen dann gesammelt in den OPV ein. Bei diesem virtuellen Nullpunkt ergibt sich das Massepotential aus einem Regelungsvorgang und im Punkt gilt die Knotenpunktregel. Die Summe der zufließenden Ströme entspricht also jener der abfließenden Ströme. [42]

Dementsprechend laufen die Einzelspannungen der Batterien am invertierenden Eingang des OPV zusammen und werden von diesem aufaddiert. Durch die geeignete Dimensionierung des Widerstands in der Rückkoppelung erhalten wir anstatt der Summe der Eingangsspannungen, den Mittelwert aus den Eingangsspannungen. Ausgegeben wird also nach erfolgter Operation der invertierte Mittelwert aus der Summe der eingegangenen Einzelspannungen.

Die zugrundeliegende Kalkulation sieht folgendermaßen aus:

$$R_1 = R_2 = R_N = R_x \quad (16)$$

Daraus folgt für die Ausgangsspannung U_o

$$-U_o = \frac{R_3}{R_x} * (U_{i1} + U_{i2} + \dots + U_{iN}) \quad (17)$$

Dieser Wert muss nun zurück auf die Rechnerplatine übertragen werden, damit ihn der Schmitt-Trigger in Relation zu den einzelnen Batteriespannungen setzen kann und so seinen

Schwellwert für die Aktivierung des Balancings erhält. Übersteigen eine oder mehrere Batteriespannungen den errechneten Mittelwert, müssen die entsprechenden Balancer auf den jeweiligen Batterien aktiviert werden, um den Ladezustand auf ein gemeinsames Level abzusenken. Sobald die Batteriespannungen nicht mehr beziehungsweise nur mehr um einen bestimmten Toleranzwert von der Referenz abweichen, ist der untere Schwellwert für den Schmitt-Trigger erreicht und er deaktiviert die aktiven Balancer.

Aus Platzgründen habe ich diese Schaltung getrennt von der Hauptrechenplatine auf einem kleinen Lochraster mit den Abmessungen 50x60mm untergebracht. Als Operationsverstärker kommt ein TL082 zum Einsatz. Der TL082 ist achtpolig und verfügt über zwei interne Kreise. Da der Mittelwertbildner lediglich aus Platzgründen auf eine extra Platine ausgelagert werden musste, ist dieser OPV für die Aufgabe vollkommen ausreichend. Das dazugehörige Datenblatt kann dem Anhang entnommen werden.

Das Lochmasterlayout zeigt den Aufbau dieser kompakten Einheit. Auf der linken Seite wird die Versorgung für den OPV angebracht. An der Oberseite werden die sechs Einzelspannungen aus den Oerlikon Akkumulatoren über einen Eingangswiderstand geleitet und anschließend gesammelt am Eingang des Operationsverstärkers eingebracht. In einer inneren Rechenoperation werden diese aufaddiert. Es ergibt sich also die Summe aus den sechs Eingangsspannungen. Der parallelgeschaltete Kondensator dient der Glättung des Signals, um stets ein entstörtes Signal ohne Rauschen zur Verarbeitung weiterzugeben. Das von dieser Gruppe errechnete und ausgegebene Signal wird in weiterer Folge zurück an die Rechenplatine übermittelt.

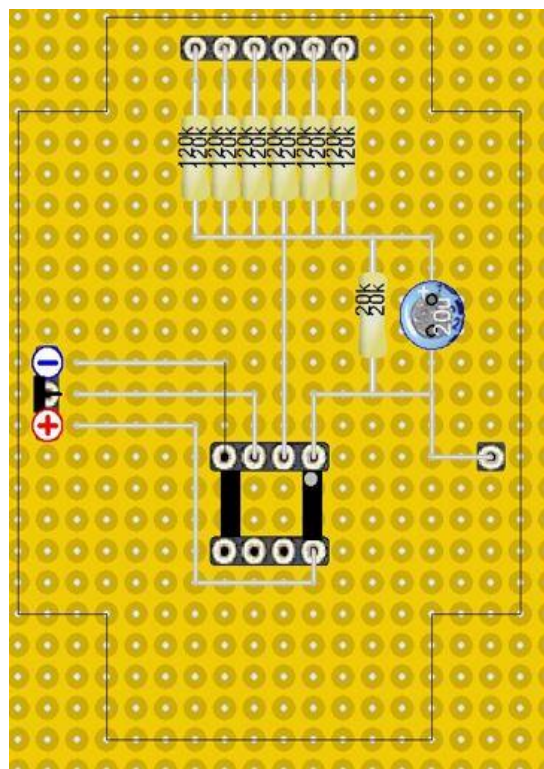


Abbildung 5-14: Lochmaster Layout für den Mittelwertbildner

5.1.4 Schmitt-Trigger

Auf den jeweils linken Seiten der TL064 Operationsverstärker werden die Batteriespannungen zur weiteren Berechnung aufbereitet und an eine Mittelwert-Einheit weitergeleitet. Diese addiert die eingehenden Batteriespannungen und bildet ihrem Namen entsprechend den Mittelwert daraus. Dieser Mittelwert wird wiederum zurück an die Rechnerplatine übermittelt und dient als Referenzwert für die Balancing-Kalkulation.

Für diese Aufgabe habe ich den bereits zuvor beschriebenen Schmitt-Trigger eingesetzt. Er dient als Komparator und vergleicht in dieser Funktion jede Batteriespannung mit dem Mittelwert aus der Summe der Spannungen. Liegt die Spannung einer Batterie über dem

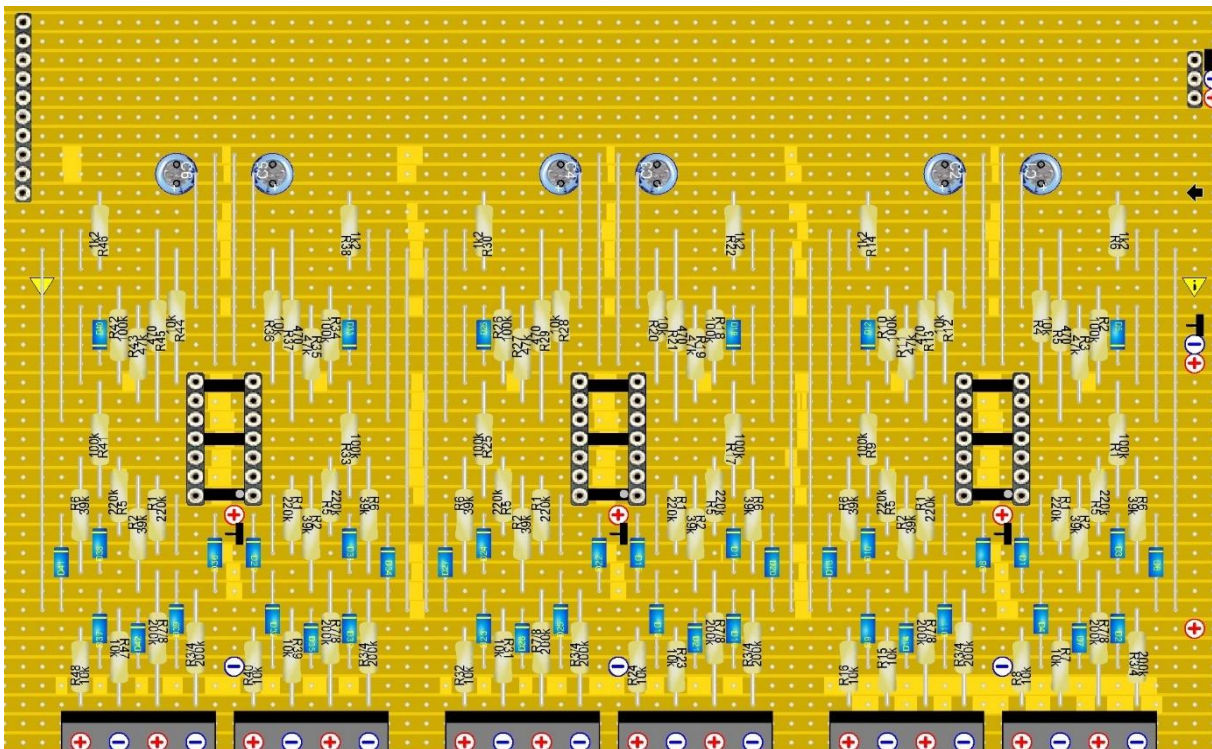


Abbildung 5-15: Lochmaster Layout der Recheneinheit

Mittelwert so aktiviert der Schmitt-Trigger die Balancing-Einheit an dieser Batterie. Erst wenn die Batteriespannung und der Mittelwert wieder übereinstimmen, sendet der Schmitt-Trigger das Signal zum Beenden des Balancing-Vorgangs. Es kommt dadurch nicht zu einem Balancing-Prozess mit variablem Strom, sondern zu einem zeitlichen Mitteln der Strompulse über das definierte Ein- und Ausschalten der Balancing-Widerstände entsprechend den empfangenen Schwellenwerten. Dadurch wird verhindert, dass die Balancing-Einheiten schon bei kleinsten Abweichungen angesteuert werden und der gewünschte Prozess in einem unkontrollierten Balancing-Stakkato resultiert. Dies würde die Schalttransistoren unnötigerweise beanspruchen.

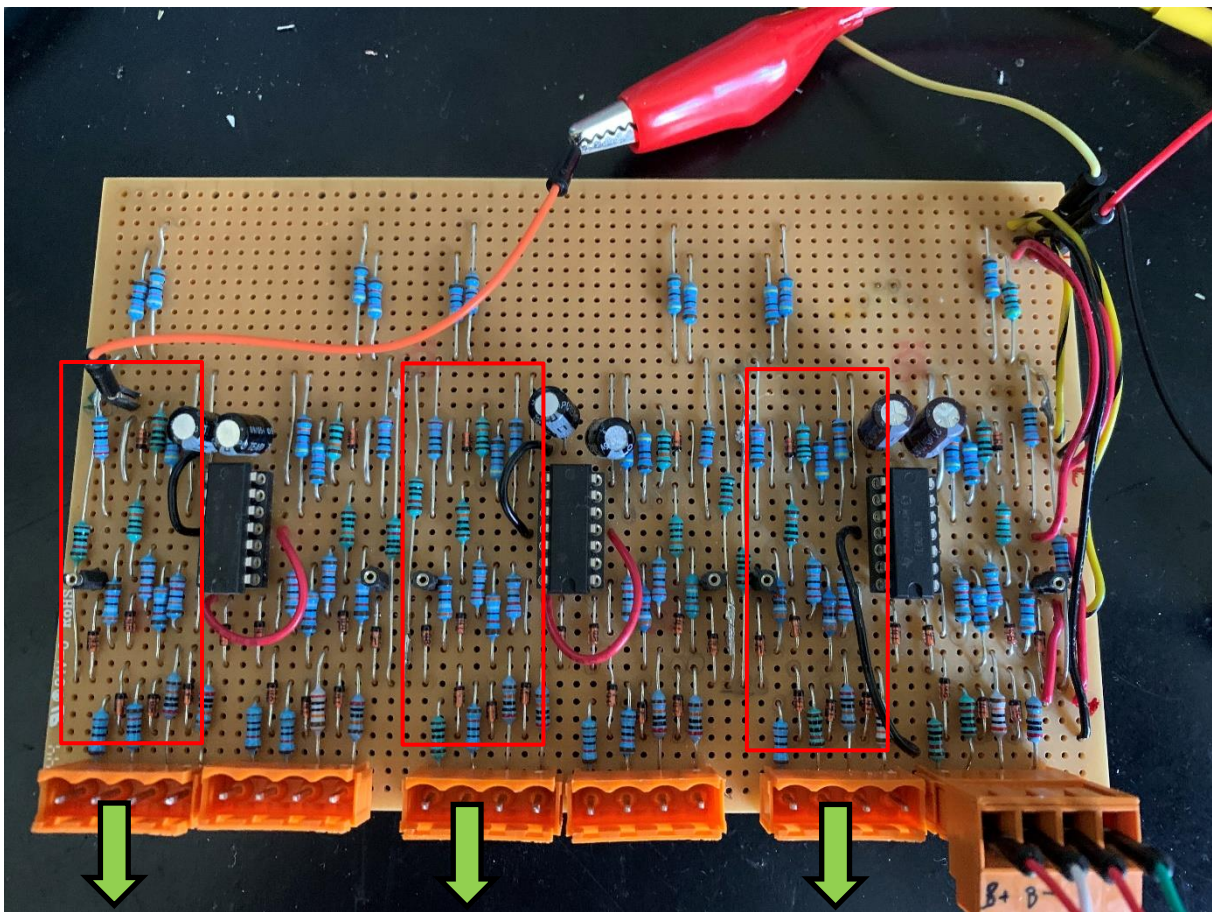


Abbildung 5-16: Schmitt-Trigger-Einheiten und Signalausgabe der Recheneinheit

5.1.5 Balancer

Die Balancer-Schaltung ist derjenige Bestandteil des Systems, der letztendlich den aktiven Ladungsausgleich ausführt und damit den SOC der Akkumulatoren aufeinander anpasst. In der jetzigen Version habe ich die Balancing-Einheit für jeden Akkumulator extra ausgeführt. In vorhergehenden Versuchen habe ich gesamtheitliche Balancing-Platinen aufgebaut, bei denen alle Balancer gesammelt auf einer Platine untergebracht sind. Im Praxistest hat sich herausgestellt, dass diese Platine und die darauf befindlichen Komponenten sehr hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Dies liegt an der Abwärme des Balancing-Prozesses, die durch die hohe Bauteildichte am Board nicht mehr effektiv abgeleitet werden kann. Die dauerhaft erhöhte Temperatur beeinträchtigt die Bauteile, ihre Funktion und führt zu einer Reduktion der Lebenszeit. Aus diesen Gründen habe ich mich für ein Design entschieden, bei dem jede Batterie über einen einzelnen, getrennt aufgebauten Balancer verfügt. Im Falle eines Fehlers in der Balancing-Einheit lässt sich dieser zudem leichter isolieren oder die Einheit austauschen, was für mehr Praktikabilität in der Alltagsanwendung sorgt.

Die Balancer-Schaltung baut auf einem SFH 600-2 Optokoppler auf. Das Datenblatt zum Bauteil ist im Anhang angefügt. Optokoppler sind vierpolige Elektronikbaueile, in deren Inneren sich zwei galvanisch getrennte Stromkreise befinden. Der eingangsseitige Stromkreis verfügt über eine Leuchtdiode (LED), während sich im ausgangsseitigen Stromkreis eine

Empfängereinheit in Form eines Fototransistors befindet. Demzufolge wird das eingehende Signal von diesem Bauteil in ein Lichtsignal umgewandelt, das vom gegenüberliegenden Ausgangstromkreis empfangen werden kann. Die Empfängereinheit wandelt das optische Signal wieder in einen Strom um (CTR= Current Transfer Ratio, ca. 1 bis 2) und gibt diesen aus. Dementsprechend können sich Eingangsspannung und Ausgangsspannung auf einem unterschiedlichen Potential bewegen und müssen nicht auf derselben Spannungsebene liegen.

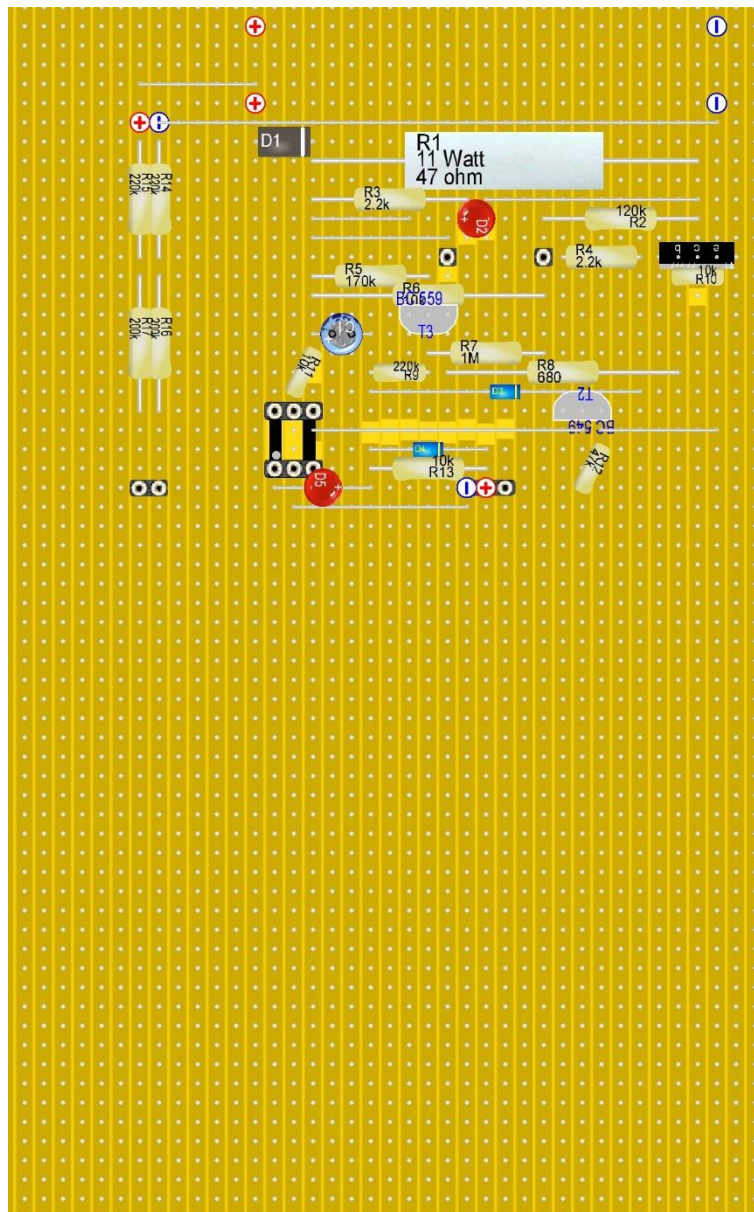


Abbildung 5-17: Lochmaster-Design für die Balancing-Einheit

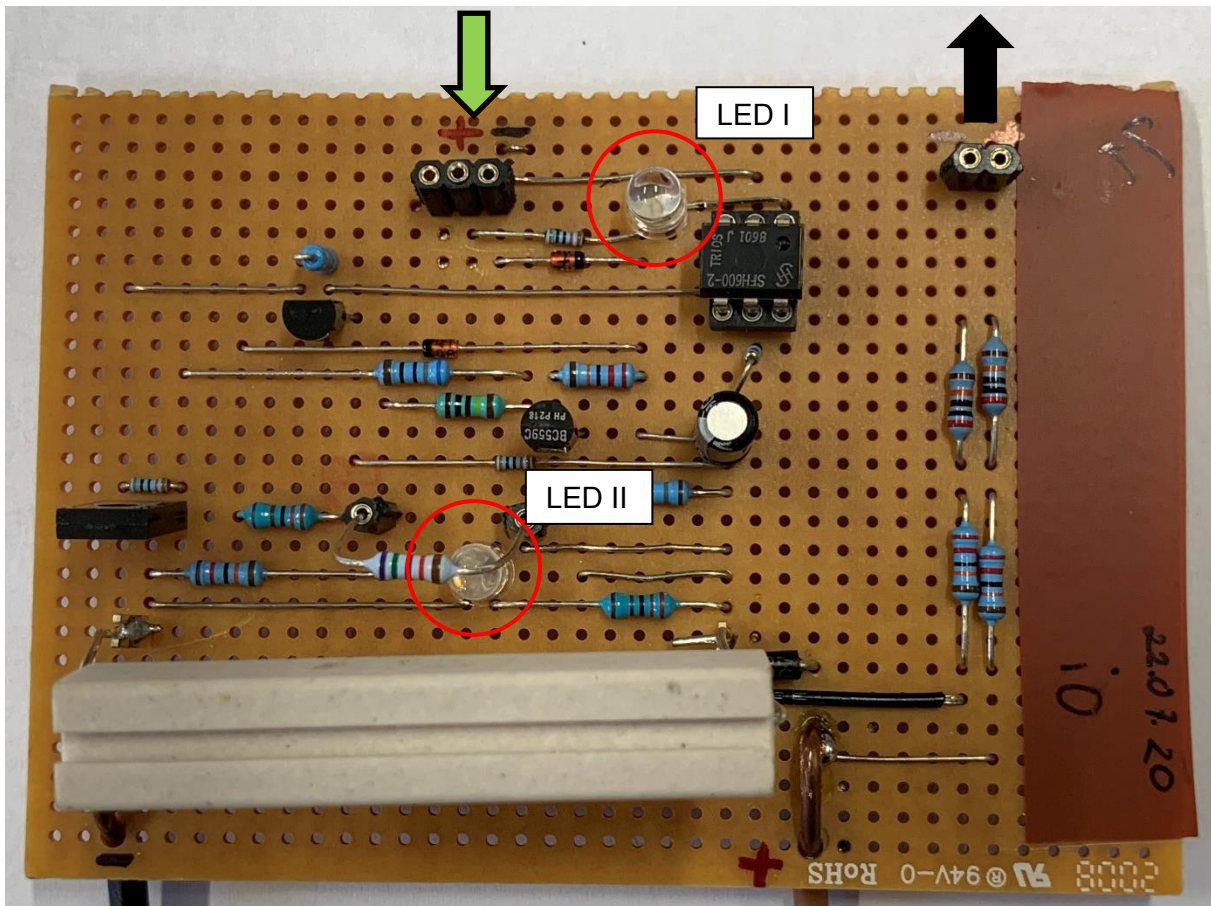


Abbildung 5-18: realer Aufbau einer Balancing-Einheit

Die Abbildung zeigt die Realisierung einer der sechs notwendigen Balancing-Platinen. Die erste LED auf der Platine zeigt an, ob die Gruppe versorgt und damit funktionsbereit ist. Die zweite leuchtet nur, wenn die Einheit aktiv balanced, also Überschussenergie aus den Akkumulatoren in Wärme umwandelt, um den Ladestand auszugleichen. Der 47 Ohm, 11 Watt Heizwiderstand zur Dissipation der Überschussenergie ist erhöht über der Platine ausgeführt, um die Kühlung effizienter zu gestalten und eine unnötige Erwärmung der Baugruppe und der darauf befindlichen Komponenten zu verhindern. Im Dauer-Testbetrieb hat der Heizwiderstand immerhin Temperaturen von 113°C erreicht.

5.1.6 Temperaturerfassung

Die Temperaturerfassung dient als zusätzliche Sicherheitsstufe in meinem Projekt. Wie bereits in Kapitel 2 unter den Zelldefekten erläutert, führt die Sulfatierung im Inneren eines Bleiakkumulators zu einer Erhöhung des inneren Widerstands. Beim Laden des Akkus steigt damit die Temperatur, weil mehr Leistung aufgebracht werden muss, um die Produkte aus der Entladereaktion mittels Elektrolyse in den Ausgangszustand zurückzuführen. Die Zelltemperatur eignet sich daher als Indikator für die voranschreitende Zellalterung. Mein System zielt auf die Früherkennung betroffener Batterien ab. Diese sollen rechtzeitig detektiert werden, um sie auszutauschen, bevor ein Schaden entstehen kann oder andere Batterien im Verbund beeinträchtigt werden.

Die Thermographie in der nachstehenden Abbildung zeigt die Erwärmung im Inneren des Batteriegehäuses. Auch wenn dieser Akku noch eingesetzt werden kann, weist er nur geringe Kapazität auf und stellt damit eine Limitation für das gesamte Akkupack dar. Hinzu kommt, dass seine limitierte Kapazität sowohl den Lade- als auch Entladevorgang des Batteriearrays bestimmt und so die Alterung der anderen Batterien im Verbund beschleunigt. Die Früherkennung und der Austausch dieses Akkus erhöhen letztendlich die Standzeit des Gesamtsystems und tragen so zur Steigerung der Effizienz bei.

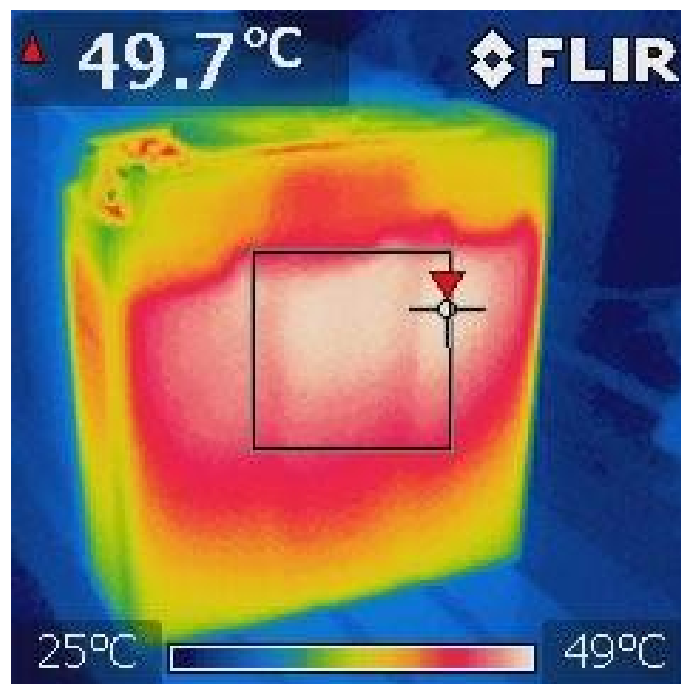


Abbildung 5-19: Thermografie eines beeinträchtigten Oerlikon 12P50 Akkumulators

In der nächsten Abbildung wird der Temperaturunterschied zwischen den intakten Oerlikon Akkumulatoren und der defekten Einheit besonders deutlich.

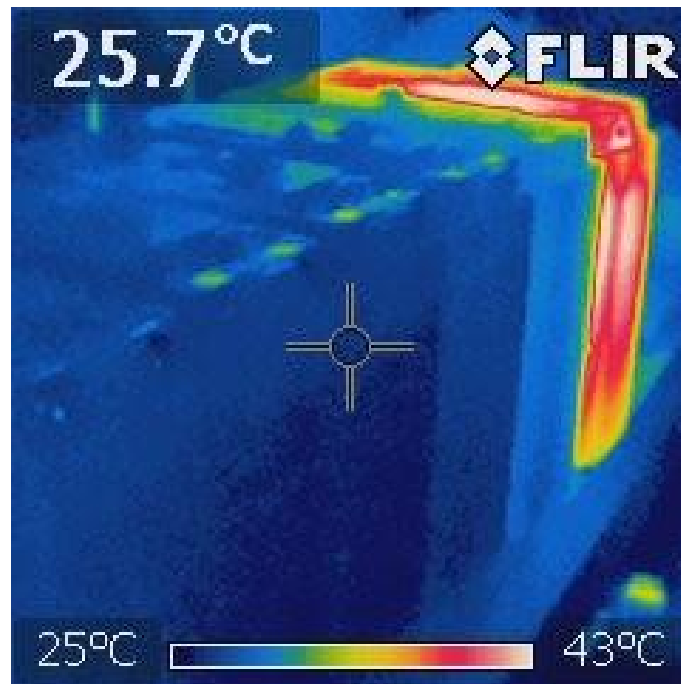


Abbildung 5-20: Vergleich der Außentemperaturen der 12P50 Akkumulatoren im Versuchsaufbau

Die Erfassung der Batterietemperaturen erfolgt auf einer separaten Platine, losgelöst von der zentralen Rechenplatine. Als Temperatursensor wird der TMP36 verbaut. Dieser deckt ein Messspektrum von -40°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ ab und reicht damit aus, um die Umgebungstemperatur und die Temperaturen am Batteriegehäuse vollständig abzubilden.

Die zugrundeliegende Schaltung sieht folgendermaßen aus:

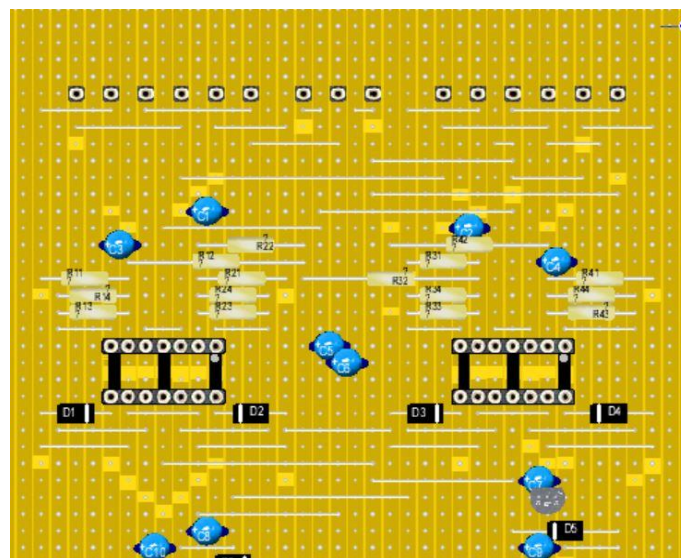


Abbildung 5-21: Lochmaster Layout der TMP-36 Temperaturmessung

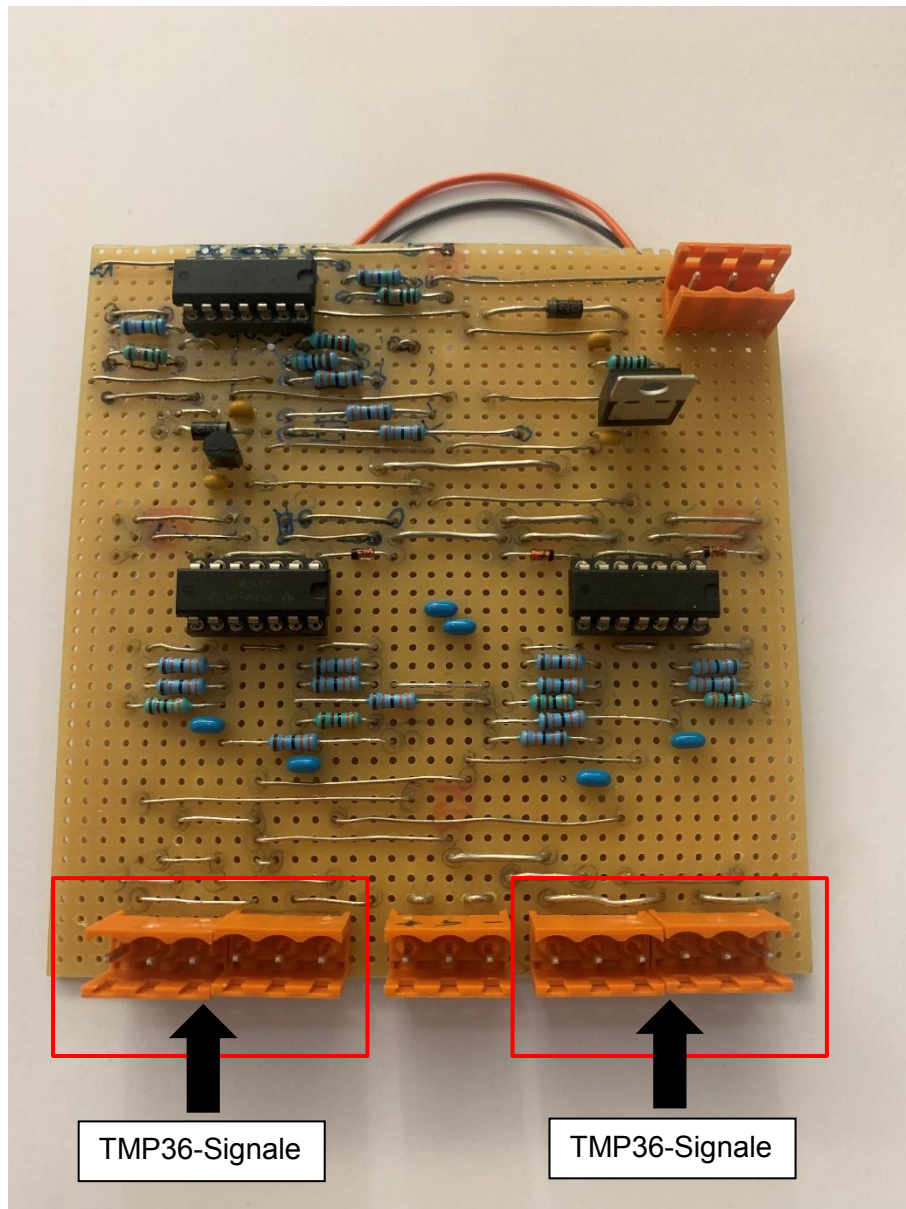


Abbildung 5-22: Aufbau der Temperaturmessung

Im Lochmasterentwurf habe ich ursprünglich nur die Temperaturerfassung designt. Nach Realisierung hat sich gezeigt, dass auch die Mittelwertbildung, Maximalwertberechnung und Ausgabe durch geschicktes Routing am oberen Ende der Platine realisierbar sind.

Über den Anschluss in der Mitte der Platine erfolgt die Versorgung der Platine. Die übrigen vier Anschlüsse links und rechts der Versorgung dienen als Signaleingang für die Temperatursensoren. Drei Sensoren erfassen die Temperaturen zwischen den Batterien. Der vierte Sensor misst die Umgebungstemperatur als Referenzwert. Verarbeitet werden die Signale von den verbauten Operationsverstärkern. Hier kommen wiederum die TL064CN OPVs zum Einsatz. Diese verarbeiten im ersten Schritt die Eingangssignale aus den TMP36, indem sie die Temperatur aus der eingehenden Spannung ableiten. Als Referenz gilt der Bereich von 0V bis 1,75V als äquivalent zu -35°C bis 125°C .

Nach der Erfassung der Batterietemperaturen wird der Mittelwert daraus gebildet und das Maximum aus den gemessenen Temperaturen berechnet. Auf der Displayeinheit werden die Umgebungstemperatur, die Maximaltemperatur und der Mittelwert aus den Batterietemperaturen ausgegeben. Anhand dieser drei Werte lassen sich Rückschlüsse auf den Allgemeinzustand der Oerlikon Akkumulatoren ziehen. Sollte der gemessene Maximalwert eklatant von den anderen Werten abweichen, deutet das auf einen Zelldefekt der entsprechenden Batterie hin. Diese sollte in weiterer Folge mittels thermographischer Aufnahme überprüft und bei Bestätigung des Verdachts ausgetauscht werden.

5.1.7 Displayeinheit

Die Displayeinheit dient als optische Ausgabe der erfassten und errechneten Messwerte aus Balancing und Temperaturmonitoring. Die gezeigte Platine erhält über das Balancing-Modul die Ist-Werte der Batteriespannungen und gibt diese direkt an den Liquid Crystal Displays (LCDs) aus. Diese Einheit dient als zusätzliche Kontrolle für das Balancing, da sich hier die unterschiedlichen Batteriespannungen ablesen lassen und somit ersichtlich ist, welche Batterien gebalanced werden müssen, um die Ladestände aufeinander anzugleichen.

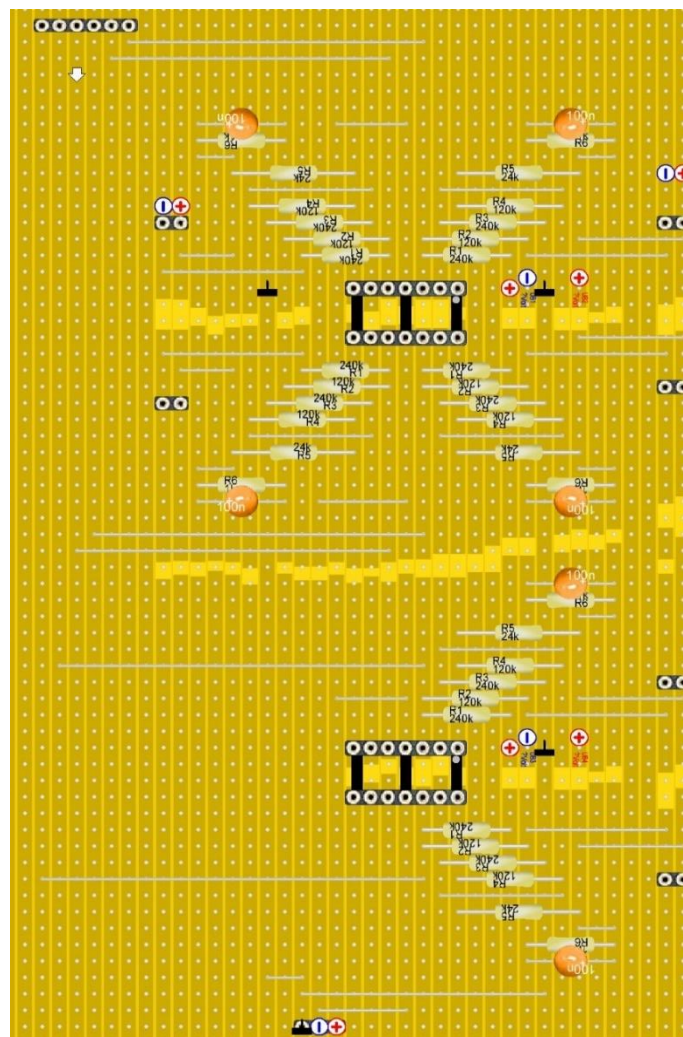


Abbildung 5-23: Lochmaster Layout für die Beschaltung der Displayeinheit

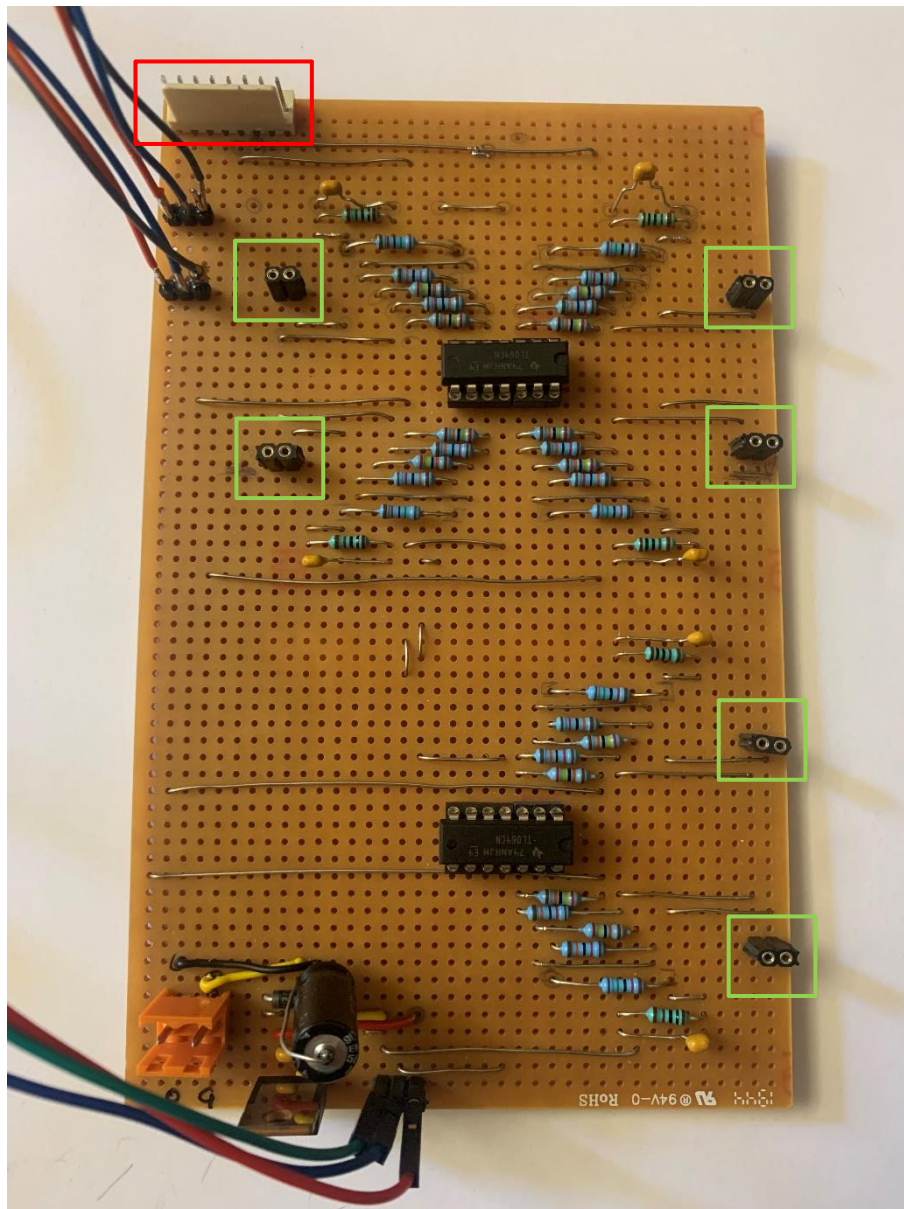


Abbildung 5-24: Aufbau der Displayeinheit vor der Verkabelung mit den übrigen Bestandteilen

Über den hier rot markierten Stecker am linken oberen Ende der Platine erfolgt der Signaleingang. Es handelt sich dabei um die Einzelspannungen der Batterien, die über die Balancing-Platinen abgenommen und über die Recheneinheit und den Mittelwertbilder bis hierhin zur Ausgabeplatine weitergeleitet werden können. Mit Hilfe dieser Platine werden die Signale so aufbereitet, dass sie letztendlich über die aufgebaute Displayeinheit visualisiert werden können. Dabei kommen hier zusätzlich zu den Batteriespannungen auch die Daten aus der Temperaturmessung an. Über die grün markierten Stecker werden die verarbeiteten Signale an die Displays übermittelt.

Die drei unteren Displays verfügen über eine Zusatzoption. Durch Umlegen des Schalters rechts an der Konsole werden hier statt der Spannungen die Ergebnisse aus dem Temperaturmonitoring angezeigt. Durch Auswahl der Schalterstellung kann man zwischen Spannungs- und Temperaturmessung umschalten. Der Modus, in dem man sich befindet, wird durch zwei kleine Indikator-LEDs neben dem Schalter angegeben. Die blaue LED steht für die Spannungsmessung, die orange für die Temperaturmessung. Da die verwendeten Displays einen fixen Kommapunkt haben, müssen die in der Temperaturdarstellung angezeigten Werte mit Faktor 10 multipliziert werden, um die Realtemperatur zu erhalten. Dies ist notwendig, weil die Spannungserfassung auf zwei Kommastellen genau erfolgen soll und so kein weiteres Umwandeln der eingehenden Signale erforderlich ist. Dies würde die Genauigkeit unnötigerweise negativ beeinflussen.

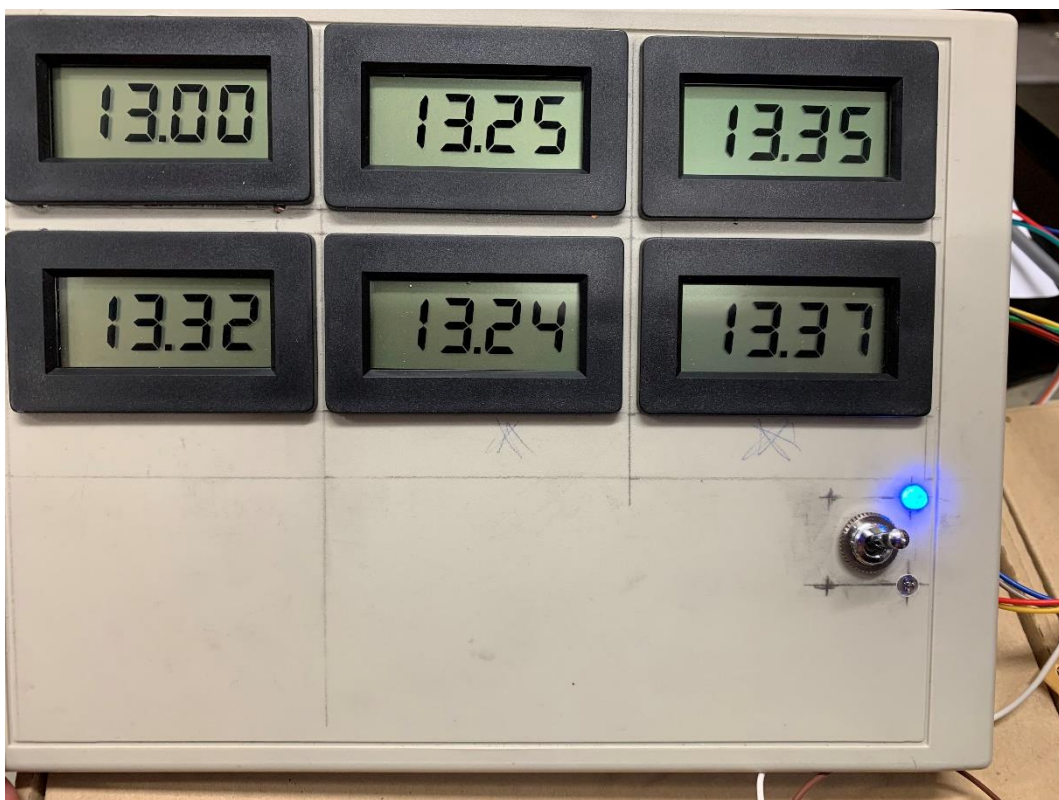


Abbildung 5-25: Anzeige der Batteriespannungen, signalisiert durch die blaue LED

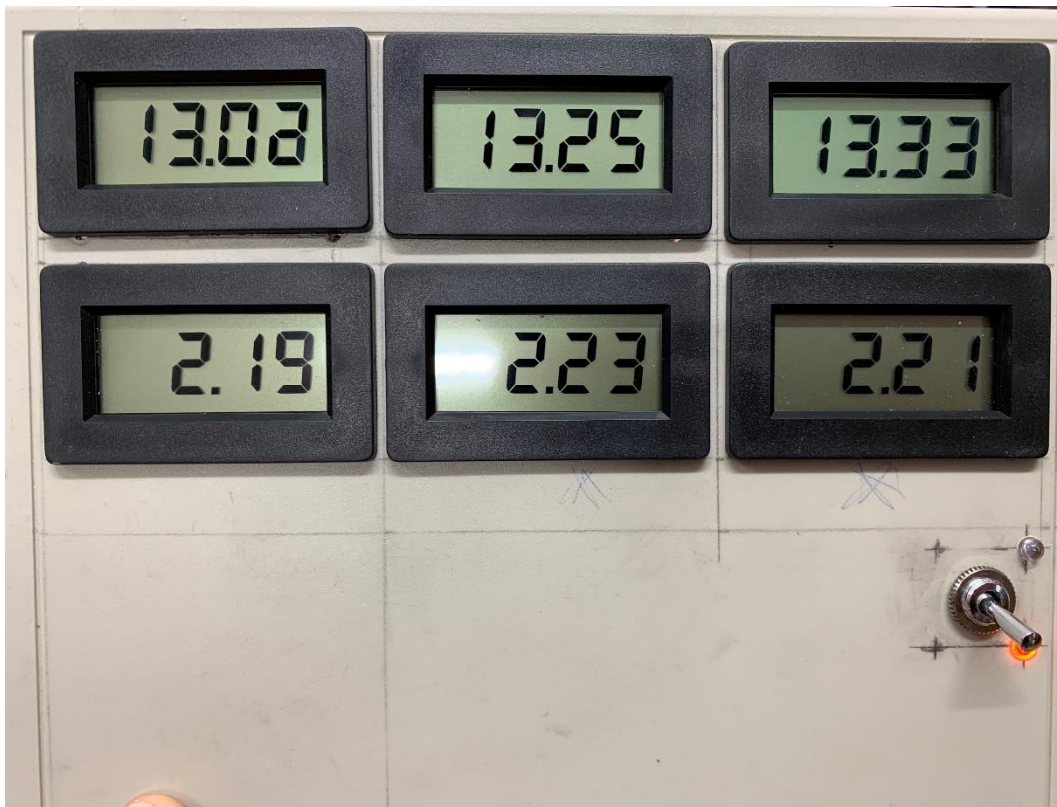


Abbildung 5-26: Temperaturanzeige auf den unteren Displays (orange LED)

5.1.8 Versorgung

Die Versorgungsplatine ermöglicht den Betrieb meiner kompletten Schaltung ohne Anbindung an das Stromnetz oder im Falle eines Stromausfalls. Dazu wird diese Platine direkt an die vorhandenen Batteriepacks geschlossen und speist in Folge die Einzelkomponenten meiner Schaltung. Die Eingangsspannung der Versorgungsplatine ergibt sich aus der Gesamtspannung der sechs Oerlikon-Akkumulatoren im Array und liegt rechnerisch bei 72V, gemessen im vollgeladenen Zustand bei 74,6V.

Die gezeigte Schaltung sorgt dafür, dass die eingehende Gesamtspannung von $\pm 36V$ auf $\pm 12V$ reduziert wird. Die Einhaltung der bipolaren $\pm 12V$ Versorgungsspannung ist notwendig, um die ordnungsgemäße Funktion der anderen Schaltungskomponenten zu gewährleisten und eine Zerstörung der elektronischen Bauteile zu verhindern. Nur so kann sichergestellt werden, dass die verbauten Operationsverstärker ordnungsgemäß ohne zu Übersteuern arbeiten und die empfangenen Signale exakt verarbeitet werden.

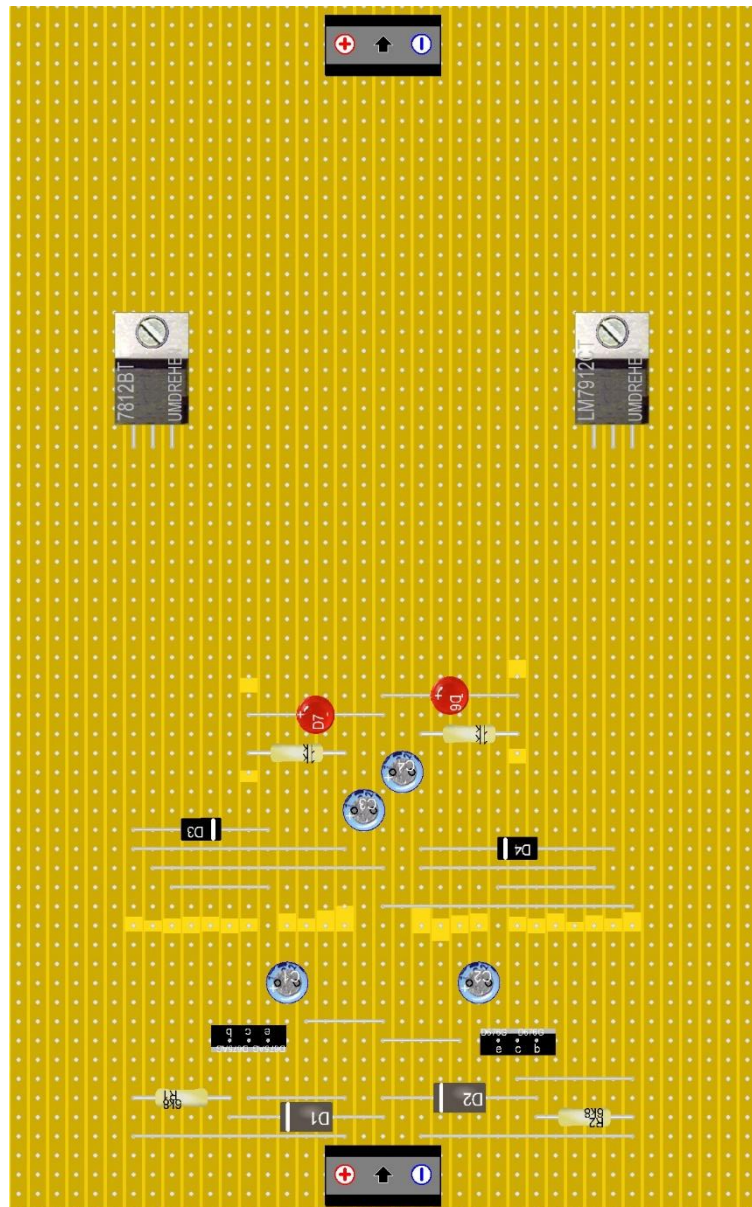


Abbildung 5-27: Lochmaster Routing der Versorgungseinheit

Gespeist wird die Versorgungsplatine über den Stecker an der unteren Seite der Platine. Hier erhalten wir eine Eingangsspannung von 74V aus dem Verbund von sechs Oerlikon Akkumulatoren. Am oberen Ende der Platine liegt an allen Ausgängen eine einheitliche Spannung von $\pm 12V$ gegen Masse an und kann über die verbauten Steckverbindungen abgegriffen werden.

Die großzügig dimensionierten Aluminiumkühlkörper sind notwendig, da die verbauten integrierten Spannungsregler 7812 und 7912 temperatugeschützt sind und bei Überlastung Spannung und Strom reduzieren. Das bedeutet, dass bei Anlegen einer Spannung Wärme aufgrund des Stromflusses durch das Bauteil entsteht. Diese Platine ist permanent mit den Batterien verbunden, um stets ein Balancing zu ermöglichen.

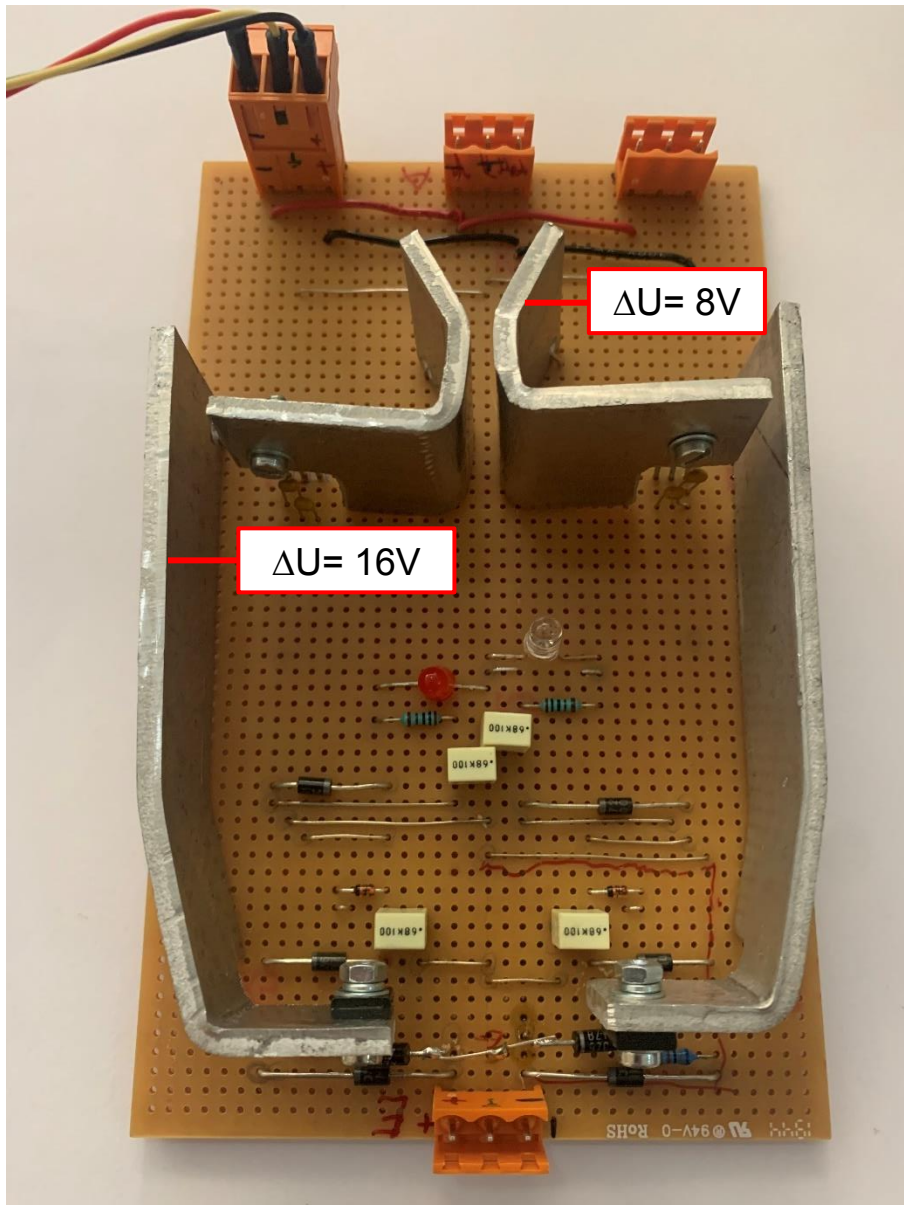


Abbildung 5-28: Realisierung der Versorgungseinheit

6 Praktische Durchführung

6.1 Versuchsaufbau

6.1.1 Vorbereitende Tätigkeiten

Vor dem ersten Aufbau des Gesamtsystems habe ich die oben beschriebenen Einzelkomponenten auf Funktion geprüft, um sicherzugehen, dass es keine Defekte innerhalb der einzelnen funktionellen Gruppen gibt, beziehungsweise um diese frühzeitig zu erkennen und so langwierige Fehlersuche im Gesamtsystem zu vermeiden.

6.1.1.1 Testen der Batterietechnik

Bei den eingesetzten Batterien handelt es sich um Bleiakkumulatoren der Firma Oerlikon. Diese verfügen über eine Zellspannung von 12V. Insgesamt sind an der Bohranlage zwei Arrays zu je sechs Oerlikon Akkumulatoren untergebracht, sodass sich für jedes der beiden Akkupacks eine Gesamtspannung von 72V ergibt. Jeder dieser Akkus wurde vor dem Verbau in Bockfließ getestet. Dazu habe ich jeden Akku bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung vollgeladen und dann über einen definierten Widerstand entladen. Dieser Entladeprozess wurde über einen Datalogger aufgezeichnet und die Entladeparameter dokumentiert. Die Messwerte aus diesem Prüfprozess sind dem Anhang zu entnehmen.



Abbildung 6-1: Versuchsaufbau zum Testen der Performance der Oerlikon 12CP50 Akkumulatoren

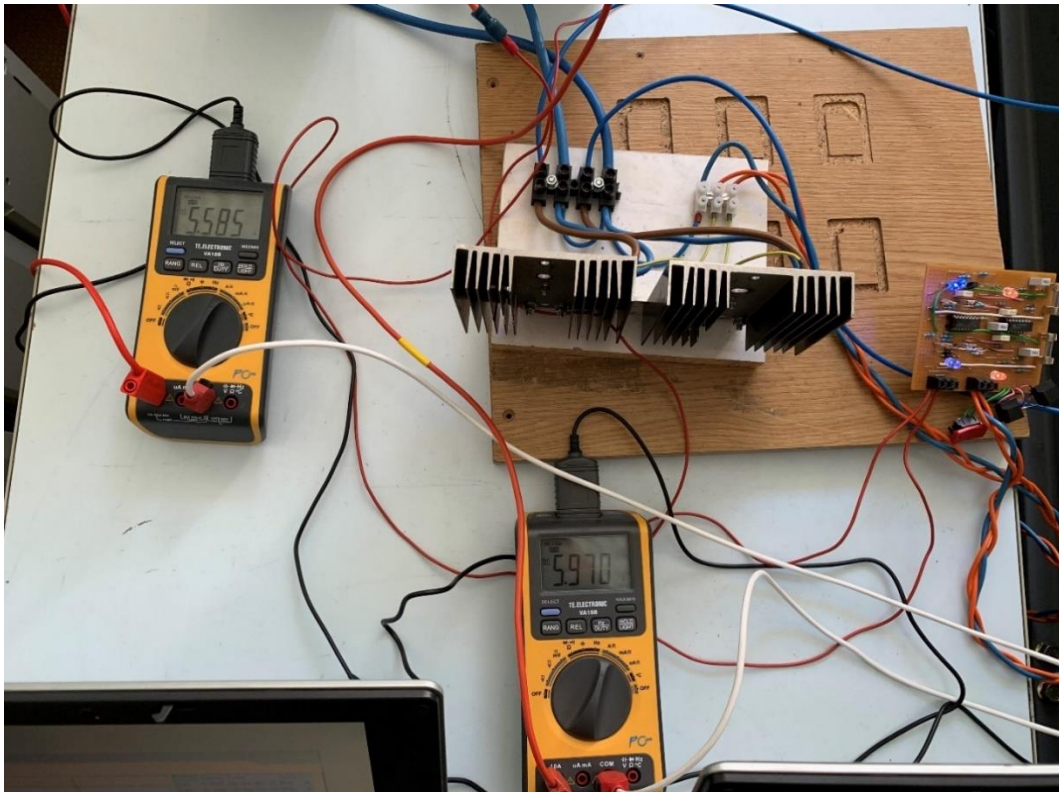


Abbildung 6-3: Monitoring des Entladevorgangs, Halbleiterschalter auf großen Kühlkörpern

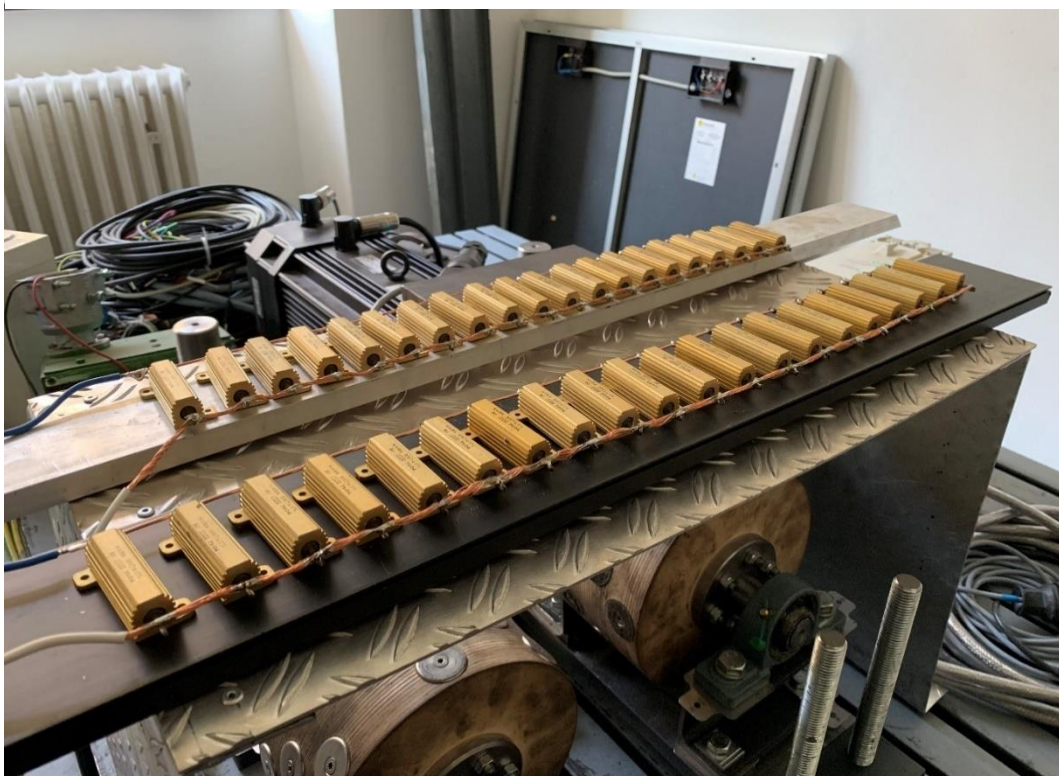


Abbildung 6-2: Widerstände auf Kühschienen zur definierten Entladung der Oerlikon 12CP50

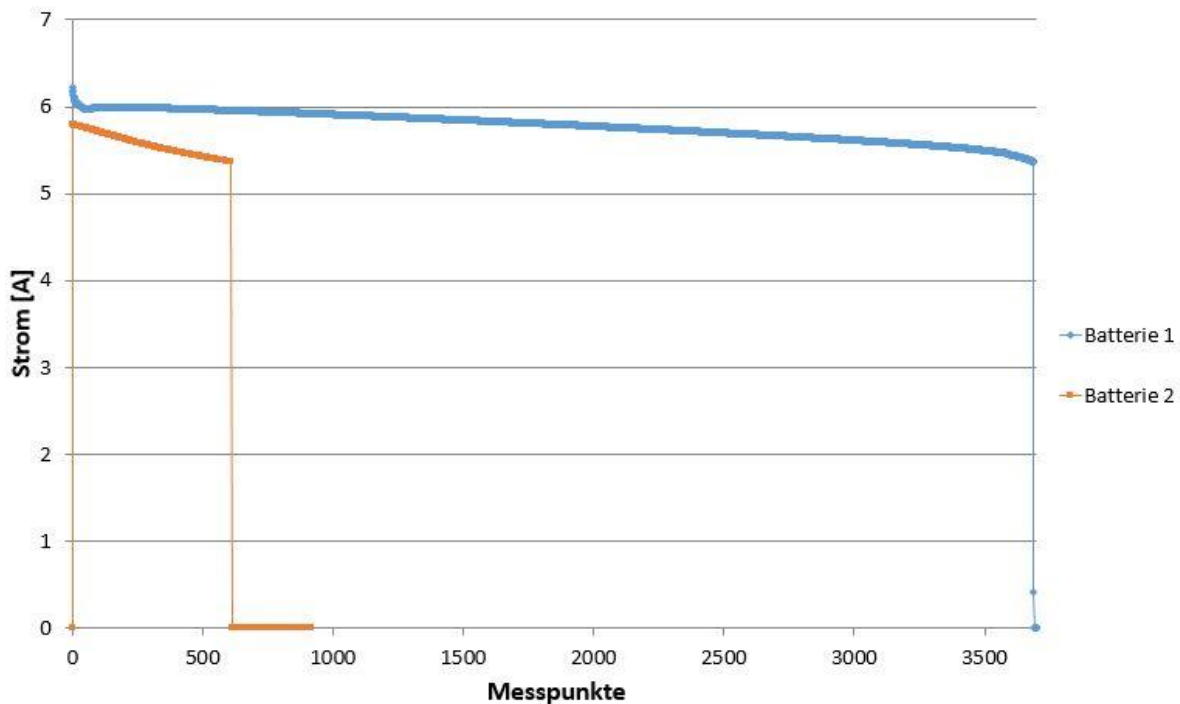


Abbildung 6-4: Kapazitätsunterschied zwischen intakter und fehlerhafter Batterie aus Batterietest

Batterien, die in diesem Test nicht die erforderliche Performance erbracht haben, lassen auf interne Schäden auf Zellebene schließen. Die Gründe dafür können wie bereits erwähnt in Alterungserscheinungen oder unsachgemäßem Gebrauch liegen. Der direkte Vergleich in der nutzbaren Batteriekapazität ist im nachstehenden Diagramm ersichtlich. Beide Batterien wurden im selben Versuchsbau mit dem gleichen Lastwiderstand beansprucht. Während Batterie 1 über 1 Stunde zum Erreichen der Entladeschlussspannung benötigt, ist Batterie 2 schon nach weniger als 10 Minuten an diesem Punkt angelangt und damit für den Einsatz an der Förderanlage ungeeignet.

Eine nachträglich durchgeführte Wärmebildaufnahme von Batterie 2 zeigt einen kleinen Hotspot im Inneren des Batteriegehäuses und deutet damit auf einen Zelldefekt hin. Bei Batterien mit erhöhter Zelltemperatur ist mit dem baldigen Zelltod zu rechnen, weshalb diese ausgemustert und ordnungsgemäß entsorgt werden. [46]

Die übrigen Batterien wurden nach bestandem Entladeversuch in den Container mit dem Messequipment transferiert und dienen dort als ortsfester Energiespeicher für die unterbrechungsfreie Stromversorgung der Messeinrichtung. Die weiteren Tests für den Versuchsaufbau der Balancing-Schaltung habe ich infolgedessen mit Labornetzteilen, die die Leistungswerte der Batterien simulieren, durchgeführt.

6.1.1.2 Testen der Messtechnik

Für diesen Test habe ich zum ersten Mal die funktionellen Baugruppen zusammengeführt und miteinander verschaltet. Anstatt der Oerlikon-Batterien habe ich für diesen Versuch sechs Labornetzteile verwendet, um unterschiedliche Szenarien und Spannungslagen zur

Aktivierung der Balancing-Module zu simulieren. Die untenstehende Abbildung zeigt diesen Versuchsaufbau am Institut für Elektrotechnik an der Montanuniversität Leoben. Durch Betätigen der Regler an den Labornetzteilen können sowohl Spannung als auch Strom individuell eingestellt werden. Auf diese Weise können Ungleichgewichte zwischen den Netzteilen erzeugt werden, die den unterschiedlichen Ladeständen von Batterien gleichkommen und dadurch den Balancing-Vorgang starten. Eine aktive Strombegrenzung sorgt für den Schutz der Komponenten, falls es während der Versuche zu einem Fehlerfall kommen sollte.



Abbildung 6-5: Versuchsaufbau am Institut für Elektrotechnik der Montanuniversität Leoben

6.2 Feldtest

Nach absolvierten Tests unter Laborbedingungen habe ich den gesamten Aufbau vor Ort in Bockfließ unter der Aufsicht von Herrn Professor Weiß vorgenommen.

Die nachstehende Abbildung zeigt die zwei Sucker Rod Pumpen, die zur Erdölförderung am Sondenplatz Bockfließ 1 eingesetzt werden. Angetrieben von einem Asynchronmotor wird die Rotationsbewegung über den Balken in eine Hubbewegung umgewandelt. Mit jedem Hub wird so Erdöl aus dem Bohrloch gefördert. Der Förderhub muss motorisch unterstützt werden, um das Rohöl zu Tage zu fördern. Die Abwärtsbewegung erfolgt mit dem Momentum aus der Trägheit der Schwungmasse.



Abbildung 6-6: Sucker Rod Pumpen am Förderplatz in Bockfließ

Die Bestandteile der Förderanlage sind hier auf einem Auszug aus der Literatursammlung „Petroleum Production Engineering“ detailliert angeführt.

Unmittelbar neben den Förderpumpen befindet sich der Seecontainer, in dem sich das Messequipment zur Analyse der Pferdekopfpumpen, besser bekannt als Sucker Rod Pumps, befindet. Mit dem Gesamtaufbau wird die Performance dieser Pumpen analysiert und gegebenenfalls optimiert. Ausschlaggebend dafür ist die Funktionsweise der Pumpen.

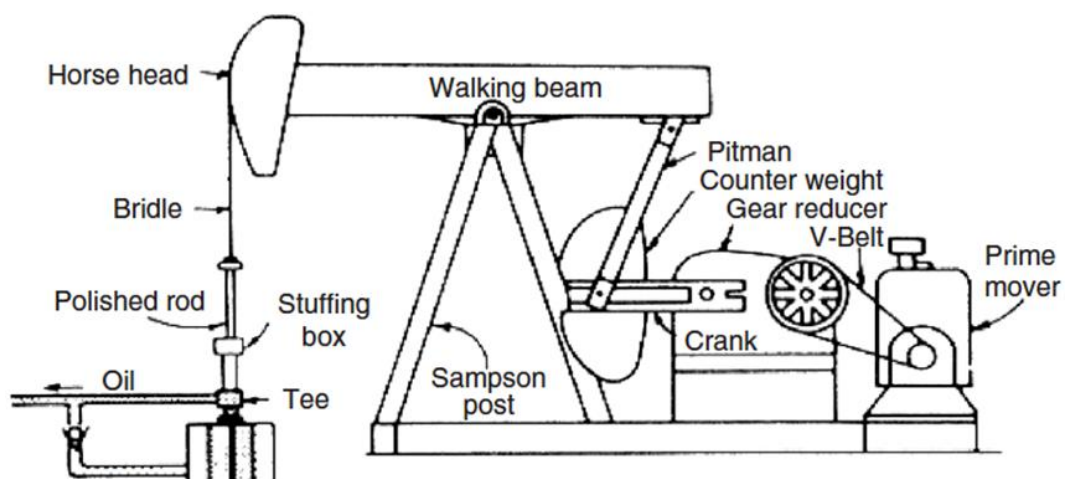


Abbildung 6-7: Aufbau einer Sucker Rod Pump nach [45]

Diese Pumpen sind über ein Getriebe mit dem Elektromotor verbunden, von dem sie angetrieben werden. Der Elektromotor ist nur aktiv, um das Fördergestänge gegen den Druck der zu fördernden Kohlenwasserstoffe in das Bohrloch zu drücken. Der Motor muss dazu die notwendige Kraft aufbringen, um die Trägheit des Fluids zu überwinden und zusätzlich die Gegengewichte an der Förderanlage in den oberen Totpunkt zu heben. Nach Überwindung des oberen Totpunkts wirken diese Gewichte als Schwungmasse und vollenden die Förderhub, bei dem der Kohlenwasserstoff zu Tage gebracht wird. Auf einem Ölfeld sind unzählige dieser Pumpen zur gleichen Zeit im Einsatz. Dies hat zur Folge, dass das Stromnetz aufgrund dieser Förderbewegung ungleichmäßig belastet wird. Es treten jedes Mal Lastspitzen auf, wenn die Elektromotoren das Gestänge in das Bohrloch schieben und zeitgleich die Schwungmassen in den oberen Totpunkt drehen müssen. Danach kommt es zu einem abrupten Abfall des Strombezugs, wenn die Gegenbewegung aufgrund des Momentums der Schwungmassen vollendet wird. Es kann sogar vorkommen, dass die Abwärtsbewegung der Schwungmassen über den Elektromotor gebremst werden muss, um Schäden an der Fördereinheit zu vermeiden. Dies ist eine zusätzliche atypische Belastung für das Stromnetz.

Der folgende Screenshot aus einer Messung zeigt, wie sich das Funktionsprinzip der Pferdekopfpumpe in der Strommessung abbildet. Wir sehen hier in rot das wirkende Drehmoment bei der zyklischen Auf- und Abbewegung der Pumpe. Hängen nun mehrere dieser Pumpen im Netz und vollführen einen annähernd synchronen Takt, ist eine entsprechend dimensionierte Kompensationsanlage notwendig, um das Stromnetz zu stabilisieren. Mit Hilfe der Strommessung und der Pumpensimulation im Versuchsaufbau der Montanuniversität Leoben soll das gleichzeitige Auftreten solcher Spitzen verhindert werden. Dazu werden die beiden Pumpen im Versuchsbau so moduliert, dass sich ihre Spitzen im besten Fall gegenseitig ausgleichen und eine gleichmäßige Belastung des Netzes erfolgt. Die Erkenntnisse dieser Arbeit liegen am Institut für Elektrotechnik der Montanuniversität auf.

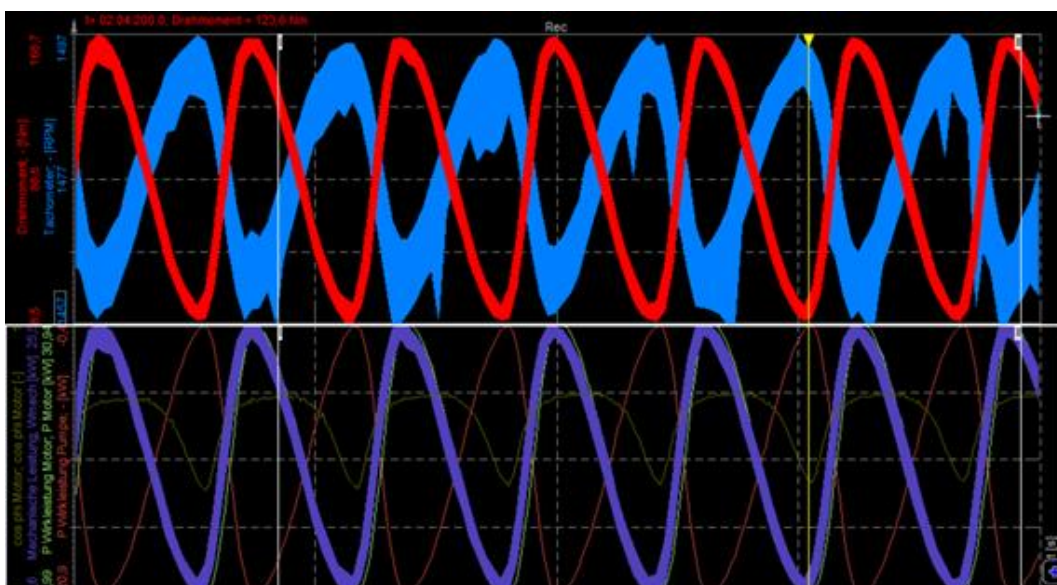


Abbildung 6-8: Auszug aus der Strommessung am Förderplatz Bockfließ

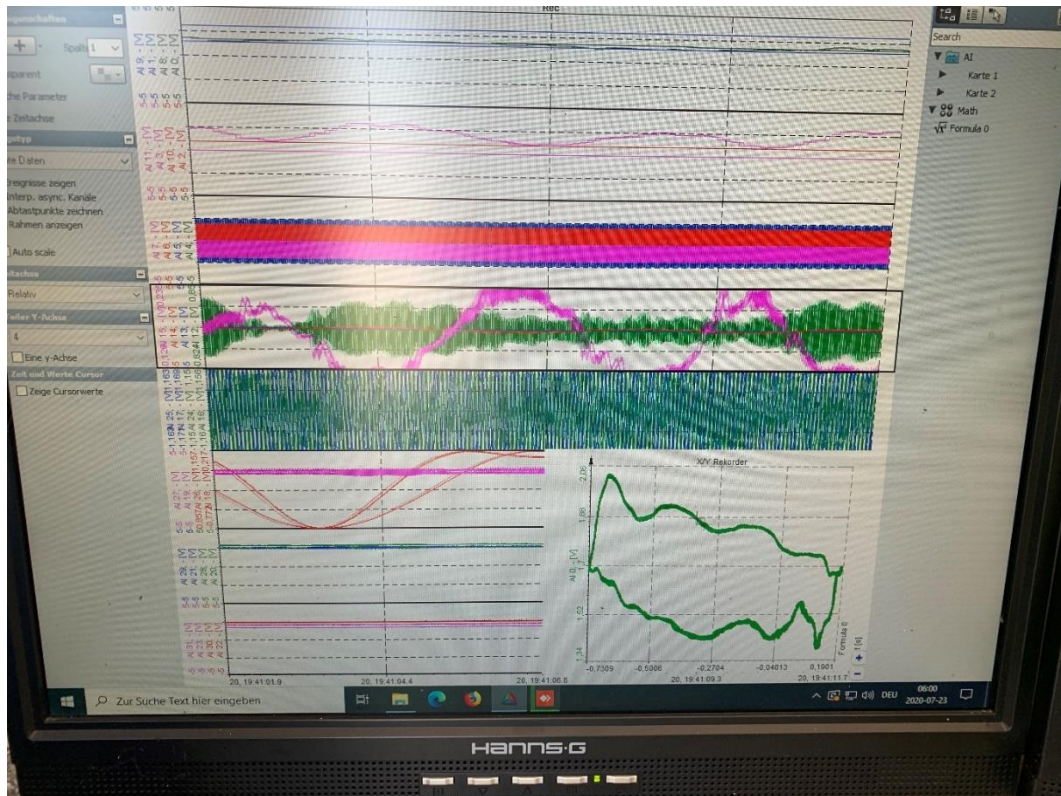


Abbildung 6-9: Monitoring der Pumpenbewegung am Förderplatz Bockfließ

Das für die Strommessung und Analyse notwendige Feldequipment ist im Container außerhalb des unmittelbaren Gefahrenbereichs der Bohrlöcher untergebracht. Die Batterien zur Speisung der unterbrechungsfreien Stromversorgung befinden sich in der Holzboxe vorne links. Zwei Arrays zu je sechs Blei-Akkumulatoren sind wie zuvor beschrieben darin untergebracht. Für den Feldversuch habe ich meine Balancing-Module an den Kontakten an der Oberseite der Batteriegehäuse befestigt. Wie schon im Laboraufbau habe ich das gesamte System nicht über das Stromnetz, sondern direkt aus den Oerlikon-Akkumulatoren versorgt.

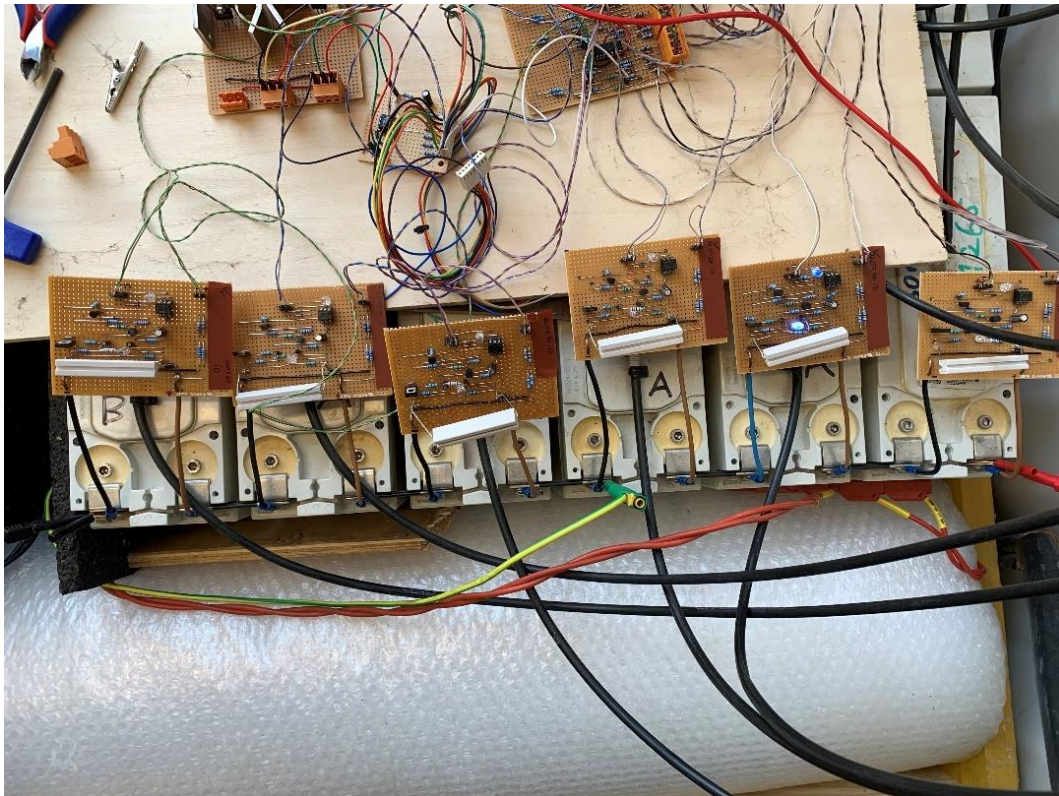


Abbildung 6-10: Verbau der Balancer für den Feldtest



Abbildung 6-11: Verbau der Stromversorgung vorne links

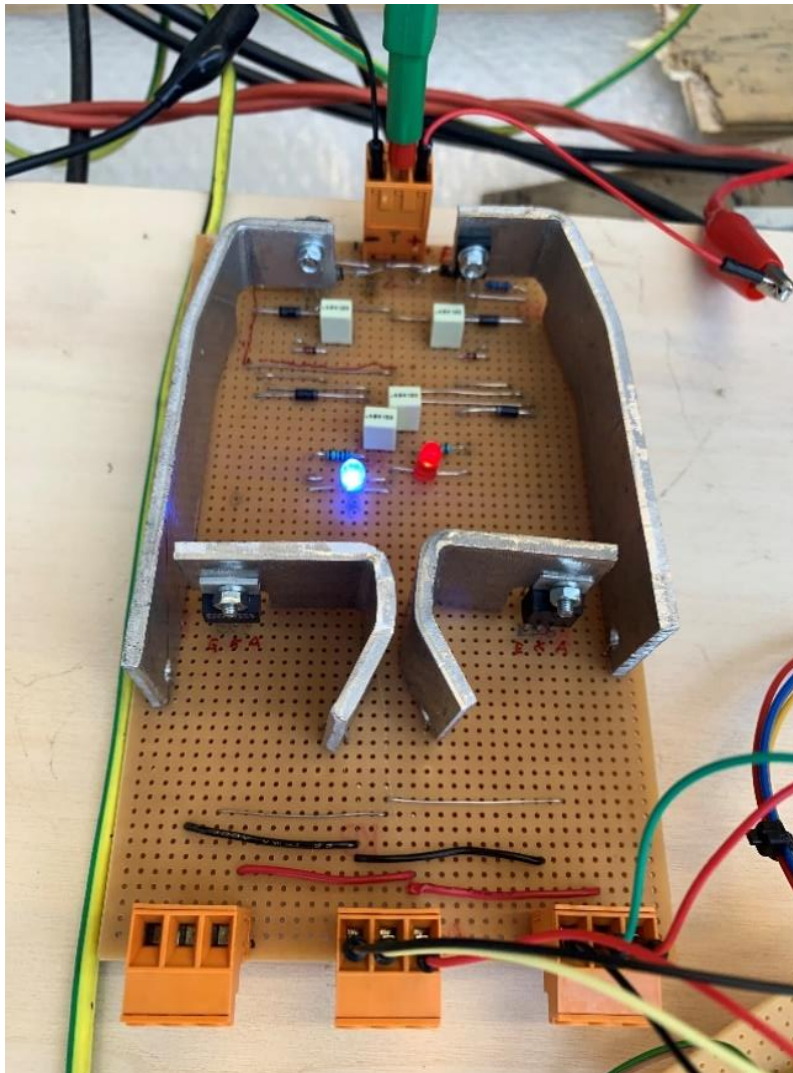


Abbildung 6-12: Sicherstellen und Prüfen der Versorgung für den Feldtest

Wie schon im Laborversuch getestet weisen die zwei leuchtenden LEDs darauf hin, dass die Versorgung für die gesamte Mess- und Recheneinheit sichergestellt ist. Die Oberflächentemperatur der verbauten Kühlkörper zeigten über den gesamten Test hinweg nur leichte Erwärmung und sind dementsprechend ausreichend dimensioniert.

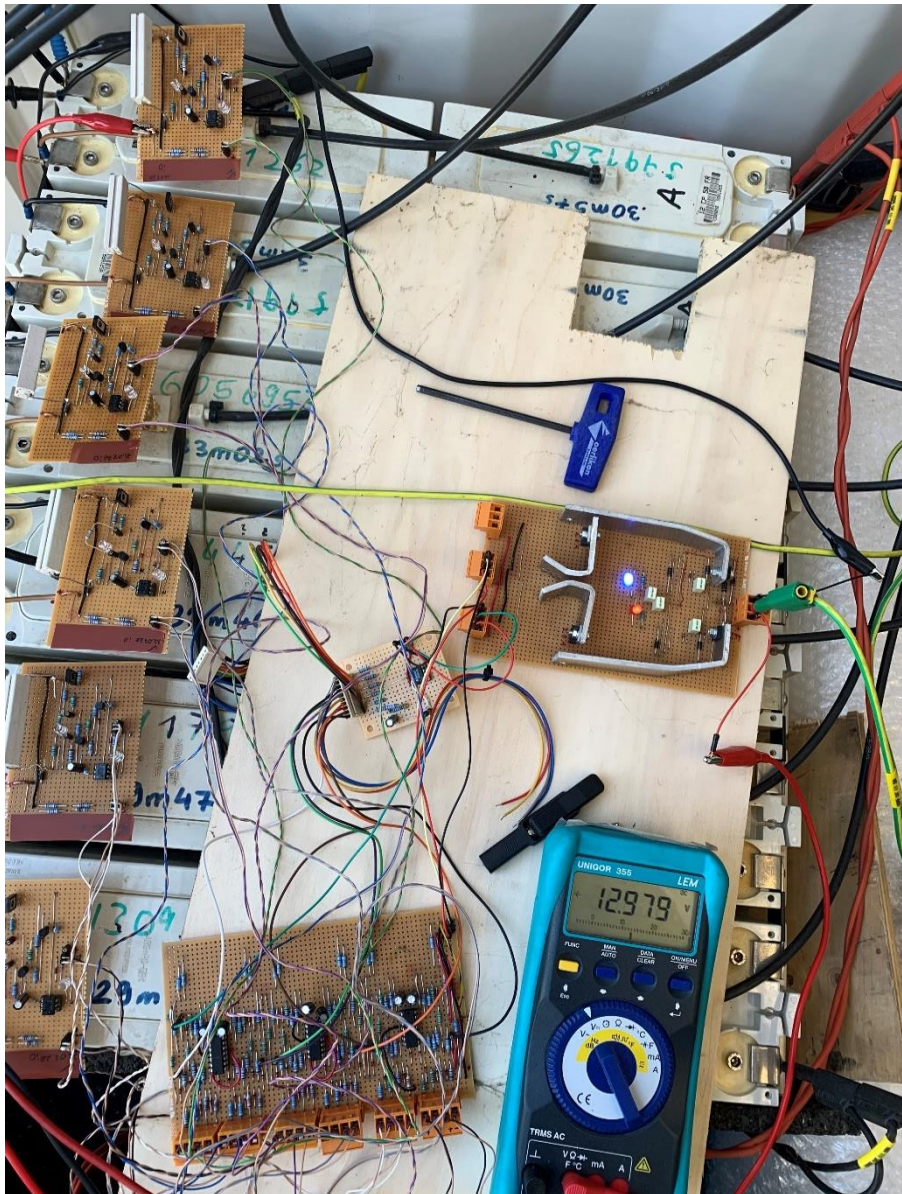


Abbildung 6-13: Überwachung des Ladeprozesses, keine Balancer aktiv

Während des ganzen Versuchs habe ich die Batteriespannungen mit einem Multimeter überprüft, um die korrekte Funktion der Balancer sicherzustellen. In Abbildung 6-13 ist zu sehen, dass die Balancer noch nicht aktiv sind, da keine der LEDs leuchtet. Die Spannung liegt im Bereich von 12,98V. Die Ladeschlussspannung einzelner Batterien wird also bald erreicht sein.

Erst mit Erreichen einer Ladespannung über 13,9V nähern sich die Akkumulatoren einem SOC von 100% und die Balancer müssen wegen der Ungleichheit der Akkumulatoren aktiv werden. Erkennbar ist das Eingreifen der Balancer an den leuchtenden Status-LEDs der einzelnen Module.

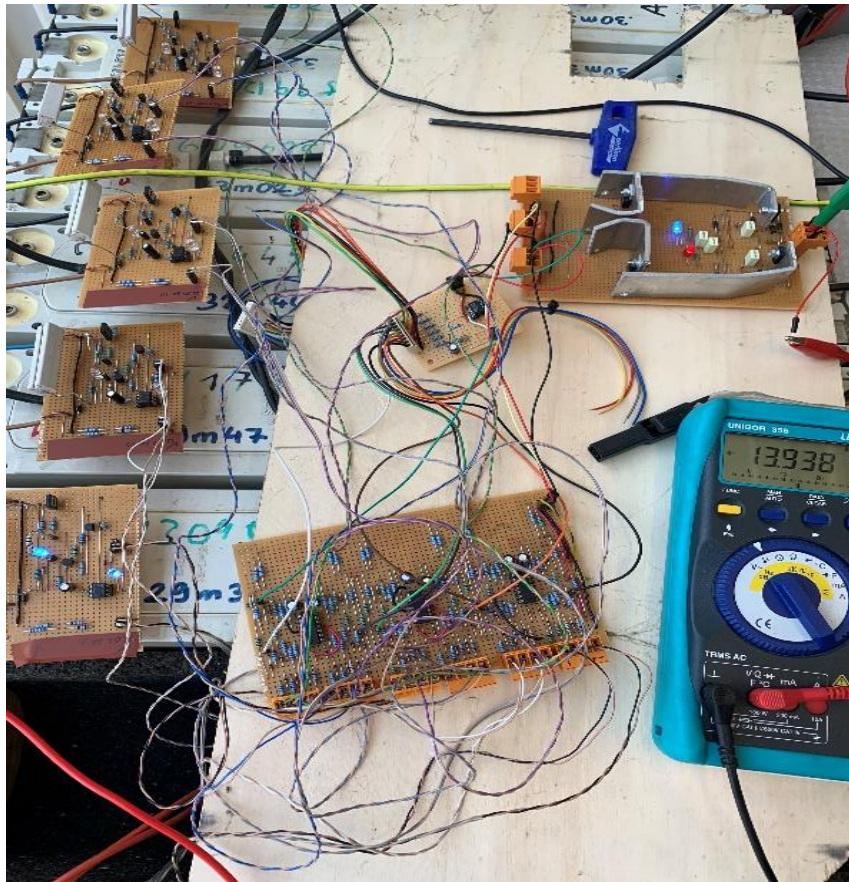


Abbildung 6-14: Ladespannung im Bereich der Vollladung

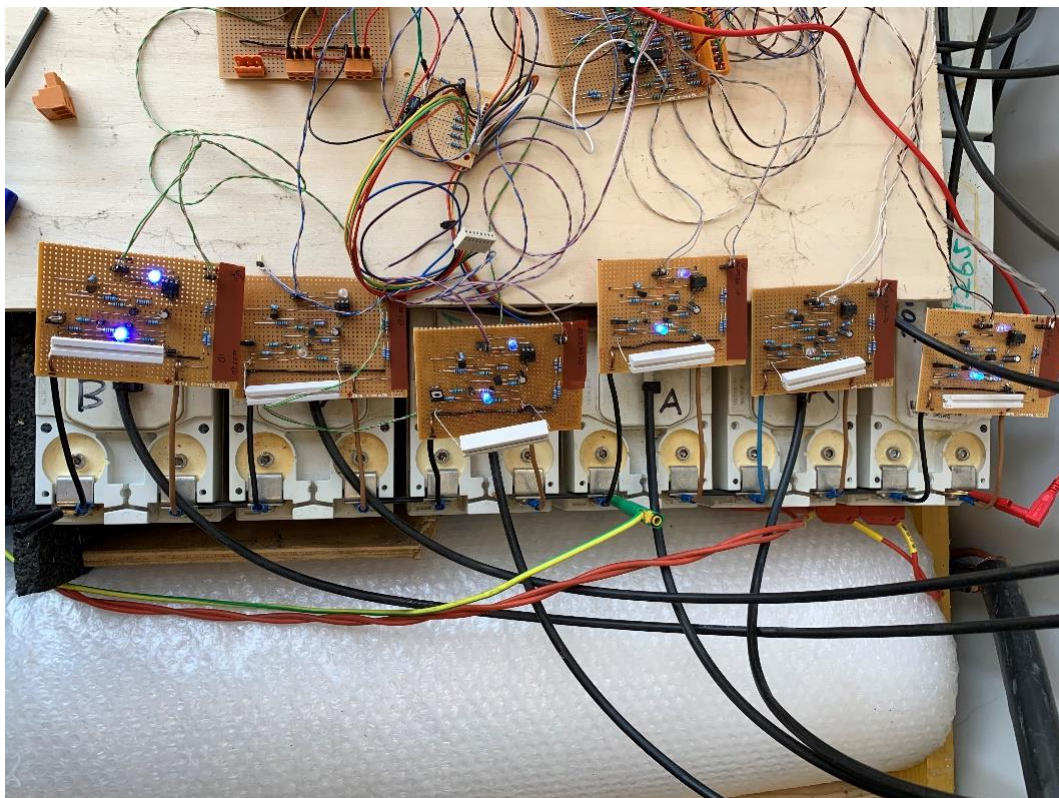


Abbildung 6-15: aktive Balancer an den Batterien 1,3,4 und 6

7 Lesson Learned & Verbesserungspotential

Wie das vorhergehende Kapitel zeigt, hat meine Schaltung sowohl den Test unter Laborbedingungen als auch den Einsatz im Feld bestanden und ihre Funktion dabei entsprechend den Anforderungen erfüllt. Die eingehenden Signale werden korrekt erfasst und weiterverarbeitet, sodass bei Bedarf alle Batterien in einem schonenden Ladeverfahren gebalanced werden. Dadurch erhalten wir eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, die im Ernstfall über mehrere Stunden hinweg die autarke Energieversorgung des Messcontainers sicherstellen kann. Es kommt somit zu keinem Ausfall dieses Equipments und damit verbunden zum Verlust der auszuwertenden Daten. Sollte es selbst nach Stunden ohne externe Stromversorgung nicht möglich sein diese wiederherzustellen, wird die letzte Betriebsmessung als Datenfile abgespeichert und geht nicht verloren. Jedes Datenfile umfasst eine Dauer der Aufzeichnung von etwa 3 Stunden (1,9 Gbyte), die USV übersteht einen Stromausfall von 5 Stunden ohne Beeinträchtigung der gesicherten Spannung von 230 V AC.

Aus der Langzeiterprobung unter realen Bedingungen ergeben sich allerdings auch Potentiale zur Verbesserung zukünftiger Balancing-Systeme. Mein Projekt hat darauf abgezielt, ein robustes System für den Feldeinsatz unter erschwerten Bedingungen zu schaffen und diesen Zweck hat es gemeistert. Dabei ist der analoge Aufbau meines Systems sicher mit mehr manuellen Tätigkeiten verbunden als der Entwurf eines rechnerbasierten digitalen Systems. Der Vorteil der Anlogschaltungen liegt hier klar in der erreichten Robustheit des Systems. Wie geplant kann es über das ganze Jahr im Container aufgebaut bleiben. Es sind keine Elektronikkomponenten oder Rechner enthalten, die einer aktiven Kühlung bedürfen. Die verbauten passiven Kühlkörper der Spannungswandler sind ausreichend dimensioniert, um die Bauteile in tolerablen Temperaturbereichen zu halten. Die Balancingwiderstände sind weit genug über den Platinen positioniert, sodass sich die restlichen darauf befindlichen Bauteile nicht erwärmen und ihre Lebensdauer dadurch negativ beeinflusst werden könnte. Im Gegensatz zu computerbasierten Lösungen ist mein System selbst in der aktuell gezeigten offenen Bauform bereits widerstandsfähig gegenüber leichteren Verschmutzungen und Feinstaub, die durch die Lüftungsöffnungen des Containers in den Innenraum gelangen. Nichtsdestotrotz plane ich auch meinen Aufbau final mit einem passenden Gehäuse zu versehen. Dafür würden weitere Adaptierungen zur Platzreduktion und eine Abschirmung der Signale notwendig sein.

Der Verbau meines Systems verlängert die Lebensdauer der eingesetzten Batterien und sorgt über diesen Zeitraum hinweg zusätzlich dafür, dass die Kapazität der Zellen vollständig genützt werden kann. Eine erste Kosteneinsparung ergibt sich bereits, weil die Speichertechnik seltener ersetzt werden muss. Hinzu kommt der reduzierte Aufwand für Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten. Kosten, die durch den Totalausfall des Systems und damit einhergehenden Stehzeiten verbunden sind, können durch das Temperaturmonitoring und die damit mögliche Früherkennung von Defekten reduziert werden. Mit diesem Ansatz denke ich in Richtung prädikative Wartung und Instandhaltung, würde aber dahingehend noch weitere erhobene Daten auswerten, um akkuratere Abschätzungen zum Zustand der Batterien treffen zu können.

Darüber hinaus habe ich versucht bei Auslegung und Aufbau des Systems auf Teilegleichheit zu achten. Bei der Auswahl der Komponenten umfasst dies unter anderem Operationsverstärker, Widerstände, Kondensatoren und LEDs. Damit will ich die Kosten für den Aufbau des Systems durch Skalierungseffekte reduzieren. Dieser Punkt ist für die weitere Verbreitung des Systems ausschlaggebend, wobei ich dafür zusätzliche Standardisierungen vornehmen würde.

7.1 Detailverbesserungen

Anhand der verbauten Sensorik und erfassten Messwerten könnten weitere kausale Zusammenhänge zum Batteriezustand abgeleitet werden. Im Folgenden möchte einen kurzen Auszug als Denkanstoß für weitere Projekte anführen.

7.1.1 Balancing-Zähler

Mein aktuelles System misst die Temperatur am Batteriegehäuse und referenziert diese gegen die Umgebungstemperatur. So lässt sich voranschreitende Batteriealterung an überhöhter Batterietemperatur feststellen. Als zusätzliche Unterstützung würde sich hier ein Zähler für die durchgeführten Balancing-Zyklen anbieten. Dieser Zähler würde sich bei jeder Aktivierung der Balancer um einen Zähler erhöhen und ist für jeden Balancer separat ausgeführt. Fehlerhafte Batterien haben einen abweichenden Balancing-Aufwand als intakte und würden somit einen unterschiedlichen Zählerstand aufweisen. Entsprechend diesem Zählerstand können dann die betroffenen Batterien noch besser oder früher identifiziert und ausgetauscht werden.

7.1.2 Balancing auf Zellebene

In meinem Projekt wird der Ladestand der sechs Oerlikon Bleibatterien untereinander angeglichen. In jedem dieser Akkumulatoren befinden sich sechs fest verschaltete und außen nicht zugängliche Zellen zu einer Zellspannung von je 2V, um die Batteriespannung von 12V zu erreichen. Eine verbesserte Variante des Balancings kann hier ansetzen und statt der Batterien die darin befindlichen Zellen balancieren. Die Funktionsweise ist dieselbe. Der Aufwand zur Realisierung dieser Variante liegt zuerst im erhöhten Hardwarebedarf, damit jede Zelle mit einem Balancing-Modul kontaktiert werden kann. Darüber hinaus ist die Variante nicht für jede Art von Batterie praktikabel. Die hier verwendeten Oerlikon Bleiakkumulatoren verfügen wie viele heutzutage handelsübliche Akkumulatoren über ein luftdicht verschweißtes Gehäuse. Für ein Balancing auf Zellebene müsste dieses Gehäuse zerstört werden, um so eine direkte Kontaktierung, also eine Verbindung zu den Elektroden der darin befindlichen Zellen, herzustellen. Für eine Verbindung nach außen könnten im Idealfall kleine Bohrungen durch das Gehäuse ausreichen. Tritt dabei der gewünschte Erfolg nicht ein, muss das Batteriegehäuse großflächig geöffnet werden, um Zugang zu den Zellen zu erhalten. Diese Variante ist jedoch nicht praktikabel. Durch eine vorsätzliche physische Beschädigung der Batterien erlischt jegliche Garantie und der sichere Betrieb kann nicht mehr gewährleistet werden, womit ein großtechnischer, industrieller Einsatz wie in meiner Masterarbeit vorgesehen vollkommen ausgeschlossen ist.

8 Ausblick

Mit meiner Masterarbeit konnte ich zeigen, wie wichtig das Verständnis von elektrochemischen Speicherlösungen und deren Eigenheiten ist. Die in meinem Projekt verwendeten Akkumulatoren auf Blei-Säure-Basis stellen einen Energiespeicher dar, der in Hinblick auf Leistungs- und Energiedichte nicht mit Neuentwicklungen auf dem Sektor mithalten kann. Trotzdem bildet die Bleibatterie eine kostengünstige und sehr sichere Alternative mit hoher Verfügbarkeit und Skalierbarkeit. Die verwendeten Materialien sind einfach herzustellen und darüber hinaus vollkommen recyclebar, was nach ökologischen Gesichtspunkten und hinsichtlich Umweltverträglichkeit ein klarer Vorteil gegenüber neueren Technologien ist. Die Blei-Säure-Batterie kann somit weiterhin eine entscheidende Rolle als Brückentechnologie spielen.

Unabhängig davon will ich mit meiner Masterarbeit verdeutlichen, dass der richtige Umgang und Einsatz von elektrochemischen Energiespeichern essenziell für die Sicherung der Energieversorgung der Zukunft sind. Mit dem Ausstieg aus Kohle- und Atomkraft in Deutschland fehlen in der Energieversorgung entscheidende Kapazitäten zur Deckung der Basislast im Stromnetz. Nicht jedes Land befindet sich in der glücklichen Situation Österreichs, diese Last zu einem hohen Teil aus Wasser- und Pumpspeicherkraftwerken bedienen zu können. Das macht den weiteren Ausbau von elektrochemischen Energiespeichern unabdingbar. Nur wenn diese Speicher stets unter optimierten Bedingungen betrieben werden, erreichen sie eine hohe Lebensdauer bei größtmöglich verfügbarer Speicherkapazität. Dazu zählen für mich ein präzises Batteriemanagementsystem in Verbindung mit effizientem Balancing, sowie Schutz vor Tiefenentladung und Überladung und eine effiziente Laststeuerung. Ein geregelter Betrieb ohne übermäßige Beanspruchung der oberen und unteren Randkapazitäten kann die Lebensdauer über die übliche Zyklenzahl hinaus verlängern. Mit der Implementierung dieser Komponenten und kontinuierlichem Statusmonitoring lässt sich letztendlich nicht nur erhöhte Nutzungsdauer der Batterien bei gleichzeitig sinkenden Betriebskosten realisieren, sondern auch die Sicherheit im Alltagsgebrauch deutlich verbessern. In Kombination werden diese Parameter ausschlaggebend für die weitere Verbreitung und einen eventuellen finalen Durchbruch von elektrochemischen Speichern als Grundstein der Energieversorgung der Zukunft sein.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Paul Kesselring, Carl-Jochen Winter. 1994 World Energy Scenarios: *A Two-Kilowatt Society – Plausible Future or Illusion?* PSI-Energietage, Villigen, Paul-Scherrer-Institut
- [2] 150. Bundesgesetz: Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzespaket -EAG-Paket; Teil 6. Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften §79ff.; Stand 27.Juli 2021
- [3] Atkins, P.W. and Paula, J. de (2013) *Physikalische Chemie*. 5th edn. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [4] Mortimer, C.E., Müller, U. and Beck, J. (2015) *Chemie: Das Basiswissen der Chemie*. 12th edn. Stuttgart: Thieme.
- [5] Hans Peter Latscha, Helmut Alfons Klein (2007) *Anorganische Chemie: Chemie Basiswissen I*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag
- [6] Schulz, D. (2014) *Akkus und Ladetechniken: Das Praxisbuch für alle Akku-Typen, Ladegeräte und Ladeverfahren*. (Elektronik). Haar bei München: Franzis.
- [7] Brown, T.L. et al. (2018) *Chemie: Studieren kompakt*. 14th edn. (Pearson Studium - Chemie). Hallbergmoos: Pearson.
- [8] BB Owens, P Reale, B Scrosati (2009) 'Primary Batteries', in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*: Elsevier, pp.22–27..
- [9] Birke, P. and Schiemann, M. (2013) *Akkumulatoren: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft elektrochemischer Energiespeicher*. München: Herbert Utz Verlag
- [10] Jossen A., Weydanz W. (2006) *Moderne Akkumulatoren: richtig einsetzen*, Neusäß, Ubooks Verlag
- [11] Gellerich W. (2015), *Akkumulatoren Grundlagen und Praxis*, Shaker Media Verlag
- [12] Halaczek T.L, Radecke H.D, (1996), *Batterien und Ladekonzepte*, Franzis Verlag GmbH, Feldkirchen
- [13] Kaltschmitt M., Streicher W. and Wiese A. (2006) *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit Umweltaspekte*, Berlin Heidelberg, Springer Verlag
- [14] Wietschel M. et al (2015) *Energietechnologien der Zukunft: Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*, Wiesbaden, Springer Fachmedien GmbH
- [15] Larminie J., Dicks A. (2003) *Fuel Cell Systems explained*, West Sussex England, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium
- [16] Barsukov Y. *Battery Cell Balancing: What to Balance and How*, Texas Instruments

-
- [17] M.S. Yusof et al (2017) *Battery Cell Balancing Optimisation for Battery Management System*, IOP Conf. Ser.: Mater.Sci.Eng 184
- [18] Kutkut, N.H.; Divan, D.M. [1996] *Dynamic Equalization for Series Battery Stacks*, 18th International Telecommunications Energy Conference, Boston, MA, USA
- [19] A.K.M. Ahasan Habib et al. (2020), *Active voltage balancing circuit using single switched-capacitor and series LC resonant energy carrier*,
- [20] Liu, V.T., Chen, J.R. (2015) *Balancing for Lead-Acid Batteries of Electric Motorcycles*, AMM 764–765, 491–495
- [21] Duraisamy T., Kaliyaperumal D. (2021) *Adaptive passive balancing in battery management system for e-mobility*. Int J Energy Res.; 45: 10752– 10764
- [22] Tietze, U., Schenk, C. and Gamm, E. (2002) *Halbleiter-Schaltungstechnik: Neuer Teil: nachrichtentechnische Schaltungen*. 12th edn. Berlin: Springer.
- [23] Wupper, H. and Niemeyer, U. (1996) *Elektronische Schaltungen*. (Springer-Lehrbuch). Berlin: Springer.
- [24] Schnabel, P. (2014) *Elektronik-Fibel: Elektronik Grundlagen, Bauelemente, Schaltungstechnik, Digitaltechnik*. 6th edn. Ludwigsburg: Patrick Schnabel.
- [25] Zach, F. (1979) *Leistungselektronik: Bauelemente, Leistungskreise, Steuerungskreise, Beeinflussungen*. Wien: Springer.
- [26] Vahldiek, H. (1970) *Operationsverstärker: Eigenschaften und Anwendungen in linearen und nichtlinearen Schaltungen*. (Telekosmos-Monographien zur Automation). Stuttgart: Telekosmos-Verl. Franckh.
- [27] Federau, J (2017) *Operationsverstärker: Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen* Berlin: Springer
- [28] Horowitz, P (2015) *The Art Of Electronics* 3rd Edition Cambridge University
- [29] Crawley, G.M (2017) *Energy Storage*. 4th Edition World Scientific Publishing Co
- [30] Pistoia, G (2014) *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. Amsterdam: Elsevier
- [31] Linden, D. Reddy, T (2011) *Lindens Handbook of Batteries*. 4th Edition New York: McGraw-Hill
- [32] Riefenstahl, U (2000) *Elektrische Antriebstechnik: Leitfaden der Elektrotechnik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag

-
- [33] Lindmayer, M. (1987) *Schaltgeräte: Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag
- [34] Scheithauer, R. (1998) *Signale und Systeme: Leitfaden der Elektrotechnik*. Stuttgart: Teubner Verlag
- [35] Wupper, H. Niemayer, U. (1996) *Elektronische Schaltungen 2: Operationsverstärker, Digitalschaltungen, Verbindungsleitungen*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag
- [36] Zastrow, D (2018) *Elektronik: Lehr- und Übungsbuch für Grundsaltungen der Elektronik, Leistungselektronik, Digitaltechnik/Digitalisierung mit einem Repetitorium Elektrotechnik*. 13.Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag
- [37] Schröder, D. (2017) *Elektrische Antriebe*. 6. Auflage Berlin: Springer Vieweg Verlag
- [38] Oerlikon Stationary Batteries LTD Datasheet: *Compact Power Rackline Datasheet*. Aesch Schweiz
- [39] A.Davide (2010) *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. ARTECH HOUSE, 685 Canton Street, Norwood
- [40] Loeffler C. (2011) *UPS Basics* EATON Powerquality
- [41] Analog Devices Incorporated (2015), *Datasheet – Low Voltage Temperature Sensors: TMP35/TMP36/TMP37*. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMP35_36_37.pdf (2020, September, 2).
- [42] Texas Instruments Incorporated (2018), *Datasheet TL082/TL08xx FET-Input Operational Amplifiers*, Available: <https://www.ti.com/product/TL082>
- [43] Vishay Semiconductors (2008), *Datasheet SFH600 Optocoupler, Phototransistor Output with Base Connection*, Available: <https://www.mouser.at/ProductDetail/Vishay-Semiconductors/SFH600>
- [44] A. Arnberger (2016), *Entwicklung eines ganzheitlichen Recycling-Konzeptes für Traktionsbatterien basierend auf Lithium-Ionen-Batterien*, Montanuniversität Leoben
- [45] B. Guo, W. Lyons and A. Ghalambor (2007), *Petroleum Production Engineering*, Elsevier Science & Technology Books
- [46] C. Bode (2019), *Measurement and Hardware Simulation on Torque, Speed & Load of a Prime Mover for optimization of a Sucker Rod Pumping System*
- [47] Univ.-Prof. Dr. Werner Sitte 2019, *Elektrochemische Energiespeicherung und – umwandlung*, Montanuniversität Leoben

10 Abkürzungsverzeichnis

Ah	Amperestunden
BMS	Batteriemanagementsystem
CTR	Current Transfer Ratio
EAG	Erneuerbares Ausbaugesetz
EMK	Elektromotorische Kraft
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Leuchtdiode (light-emitting diode)
OPV	Operationsverstärker
PVC	Polyvinylchlorid
SOC	State of Charge
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Schema der galvanischen Zelle nach [4]	4
Abbildung 2-2 Elektrochemische Spannungsreihe nach [6]	5
Abbildung 2-3 Das Daniell-Element nach [4]	6
Abbildung 2-4: Standardpotential des Daniell-Elementes nach [5].....	9
Abbildung 2-5: Abgrenzung chemischer und elektrischer Speicher im Überblick nach [10] ..	12
Abbildung 2-6 Elektrodenkonfiguration in der Blei-Säure-Zelle	18
Abbildung 2-7: vereinfachter Aufbau der fertigen Batterieeinheit	20
Abbildung 2-8: Ablauf der Entladungsreaktion	20
Abbildung 2-9: Energieabgabe der Blei-Säure-Zelle	21
Abbildung 2-10: Ablauf des IU-Ladeverfahrens für Bleiakkumulatoren nach[11].....	23
Abbildung 2-11: schematische Darstellung der Säureschichtung im Inneren von Bleiakkumulatoren	25
Abbildung 2-12: Abbildung Oerlikon Rackline-Serie nach [38]	27
Abbildung 2-13: Außenansicht der Oerlikon 12CP50 Akkumulatoren	28
Abbildung 2-14: Aufnahme der fertig konfektionierten Arrays für Bockfließ 1	29
Abbildung 3-1: Limitierung der Kapazität durch fehlendes Balancing nach [39]	31
Abbildung 3-2: Durch Top-Balancing ausgeglichener Ladestand der Zellen nach [39]	32
Abbildung 4-1: Produktbild der EATON EX 3000 aus [40]	36
Abbildung 4-2: In der Markierung die integrierten Akkus mit einer Gesamtkapazität von 9 Ah	37
Abbildung 4-3: Sicht in den Seecontainer am Förderplatz Bockfließ.....	37
Abbildung 5-1: Blockschaltbild zur vereinfachten Darstellung der funktionellen Gruppen	38
Abbildung 5-2: Gesamtschaltbild in EasyEDA gezeichnet	40
Abbildung 5-3: Abbildung des unbeschalteten OPVs.....	41
Abbildung 5-4: Schaltbild eines Spannungsfolgers nach [24]	43
Abbildung 5-5: OPV als invertierender Verstärker nach [24].....	43
Abbildung 5-6: Aufbau als nicht-invertierender Verstärker nach [24].....	44
Abbildung 5-7: Beschaltung des Differenzverstärkers nach [24]	45
Abbildung 5-8: Spannungsverlauf und Schmitt-Trigger-Reaktion (invertiert) nach [24]	46
Abbildung 5-9: Aufbau einer invertierenden Schmitt-Trigger Schwellwertschaltung nach [24]	46

Abbildung 5-10: Verbindung einer Balancing-Platine mit einem Oerlikon Akkumulator	47
Abbildung 5-11: Vorwiderstände zum Anpassen des Spannungsniveaus für die verwendeten OPVs.....	48
Abbildung 5-12: Eingang der Batteriespannungen auf der Rechnerplatine	49
Abbildung 5-13: Schema des Addierers bzw. Summierverstärkers.....	50
Abbildung 5-14: Lochmaster Layout für den Mittelwertbilder	51
Abbildung 5-15: Lochmaster Layout der Recheneinheit.....	52
Abbildung 5-16: Schmitt-Trigger-Einheiten und Signalausgabe der Recheneinheit	53
Abbildung 5-17: Lochmaster-Design für die Balancing-Einheit	54
Abbildung 5-18: realer Aufbau einer Balancing-Einheit.....	55
Abbildung 5-19: Thermografie eines beeinträchtigen Oerlikon 12P50 Akkumulators	56
Abbildung 5-20: Vergleich der Außentemperaturuten der 12P50 Akkumulatoren im Versuchsaufbau	57
Abbildung 5-21: Lochmaster Layout der TMP-36 Temperaturmessung	57
Abbildung 5-22: Aufbau der Temperaturmessung	58
Abbildung 5-23: Lochmaster Layout für die Beschaltung der Displayeinheit	59
Abbildung 5-24: Aufbau der Displayeinheit vor der Verkabelung mit den übrigen Bestandteilen	60
Abbildung 5-25: Anzeige der Batteriespannungen, signalisiert durch die blaue LED	61
Abbildung 5-26: Temperaturanzeige auf den unteren Displays (orange LED)	62
Abbildung 5-27: Lochmaster Routing der Versorgungseinheit	63
Abbildung 5-28: Realisierung der Versorgungseinheit	64
Abbildung 6-1: Versuchsaufbau zum Testen der Performance der Oerlikon 12CP50 Akkumulatoren	65
Abbildung 6-2: Widerstände auf Kühlschienen zur definierten Entladung der Oerlikon 12CP50	66
Abbildung 6-3: Monitoring des Entladevorgangs, Halbleiterschalter auf großen Kühlkörpern	66
Abbildung 6-4: Kapazitätsunterschied zwischen intakter und fehlerhafter Batterie aus Batterietest.....	67
Abbildung 6-5: Versuchsaufbau am Institut für Elektrotechnik der Montanuniversität Leoben	68
Abbildung 6-6: Sucker Rod Pumpen am Förderplatz in Bockfließ.....	69
Abbildung 6-7: Aufbau einer Sucker Rod Pump nach [45]	69

Abbildung 6-8: Auszug aus der Strommessung am Förderplatz Bockfließ.....	70
Abbildung 6-9: Monitoring der Pumpenbewegung am Förderplatz Bockfließ.....	71
Abbildung 6-10: Verbau der Balancer für den Feldtest.....	72
Abbildung 6-11: Verbau der Stromversorgung vorne links.....	72
Abbildung 6-12: Sicherstellen und Prüfen der Versorgung für den Feldtest.....	73
Abbildung 6-13: Überwachung des Ladeprozesses, keine Balancer aktiv.....	74
Abbildung 6-14: Ladespannung im Bereich der Vollladung.....	75
Abbildung 6-15: aktive Balancer an den Batterien 1,3,4 und 6.....	75

12 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Elektrodenbezeichnung im Vergleich nach [47].....	7
Tabelle 2: Charakteristika chemischer Energiespeicher nach [13].....	13
Tabelle 3: Eigenschaften unterschiedlicher Akkumulatoren [8].....	14
Tabelle 4: Vergleich idealer / realer OPV.....	42